

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA UM MODELO
MATEMÁTICO DE UM REGULADOR DE MÉDIA TENSÃO COM
COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAPS**

Jefferson dos Santos Menas

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA.

Aprovada por:

Orientador: _____

Prof. Maurício Aredes, Dr-Ing.

Examinador: _____

Prof. Marcos Vicente de Brito Moreira, D.Sc.

Examinador: _____

Eng. Thiago Americano do Brasil.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2012

Dedico este trabalho à minha mãe Norma, meu exemplo de amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e por mais esta glória.

Agradeço à minha família pelo apoio e compreensão durante todos esses anos em que estive dedicado à Engenharia. Em especial minha mãe Norma Viana por tudo, minha irmã Camila Menas pela paciência e ao meu pai Laércio Menas pelas instruções.

Não menos importante, deixo aqui registrado o agradecimento aos meus amigos, a toda equipe do LEMT e em especial ao professor Mauricio Aredes pela oportunidade de trabalhar no laboratório e pelo valioso conhecimento adquirido.

“Existe apenas um bem, o saber, e apenas um mal, a ignorância.”

Sócrates

Resumo do Projeto Final de Graduação apresentado à UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica (B. Sc.)

PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA UM MODELO MATEMÁTICO DE UM REGULADOR DE MÉDIA TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAPS

Jefferson dos Santos Menas

Julho de 2012

Orientador: Maurício Aredes

Departamento de Engenharia Elétrica

Os reguladores de tensão vêm sendo utilizados nos sistemas de distribuição a fim de garantir níveis adequados de tensão aos consumidores de energia elétrica. A variação transitória de curta duração resulta em uma série de problemas indesejáveis pelas concessionárias de energia elétrica, devido fundamentalmente às necessidades de um consumidor de energia cada vez mais exigente.

Os reguladores eletrônicos de tensão propõem minimizar efeitos transitórios, tendo como base de operação os dispositivos semicondutores de potência, em um regime de condução controlado (SCR). Dessa forma, inúmeras estratégias de controle vêm sendo estudadas para esta aplicação, a fim de atender à complexidade de projetos de equipamentos na Engenharia Elétrica.

O trabalho que será apresentado sugere uma estratégia de controle automático para um regulador de tensão com comutação eletrônica de *taps*, baseada em sua topologia. O sistema é proposto tendo como base o estudo analítico do regulador, oferecendo uma nova perspectiva para sua modelagem digital. Além disso, o trabalho sugere uma nova perspectiva de implementação do controle em processadores digitais.

Sumário

1. Introdução.....	12
1.1 Estruturação do texto.....	13
1.2 Motivação para o trabalho.....	13
1.3 Objetivo	14
1.4 Contextualização	14
2. Os Reguladores de Tensão	16
2.1 Classificação	17
3. RECET.....	25
3.1 Princípios do RECET	25
3.2 Parâmetros Nominais.....	26
3.3 Topologia.....	27
4. Implementação e Validação do Modelo Matemático.....	30
4.1 Modelagem Analítica de um Regulador tipo S-DVR.....	30
4.2 Implementação do Modelo Matemático	38
4.2.1 Bloco I: Detector de Fase e Amplitude - DFA	39
4.2.2 Bloco II: Comparação - COM	40
4.2.3 Bloco III: Sistema de Seleção de TAPS - SST	41
4.2.4 Bloco IV: Lógica de Compensação Direta - LCD.....	45
4.3 Validação do Modelo Matemático	46
5. Implementação de Controle Automático em um Modelo Expandido: S-DVR20	59
5.1 Modelo Eletromagnético	59
6. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros.....	73
7. Anexo: descrição simplificada de um circuito EPLL.....	74
8. Referências Bibliográficas	77

Índice de Figuras

FIGURA 1 ESQUEMÁTICO DO REGULADOR DE TENSÃO TIPO A	18
FIGURA 2 ESQUEMÁTICO DO REGULADOR DE TENSÃO TIPO B.	18
FIGURA 3 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MONOFÁSICO DE UM REGULADOR DE TENSÃO COM CHAVES ESTÁTICAS CA BASEADAS EM CONEXÃO ANTIPARALELA DE SCR's [14].	21
FIGURA 4 COMUTADOR MECÂNICO ASSISTIDO POR CHAVE ELETRÔNICA [14].	23
FIGURA 5 SELETOR DE TAP COM CHAVES ESTÁTICAS CA [14].	24
FIGURA 6 TOPOLOGIA DO COMUTADOR ELETRÔNICO DO RECET (TIPO B) [1].	28
FIGURA 7 ARRANJO TOPOLÓGICO DO RECET [14].	31
FIGURA 8 REGULADOR DE TENSÃO DO TIPO A.....	32
FIGURA 9 REGULADOR DE TENSÃO DO TIPO B.....	32
FIGURA 10 CIRCUITO MAGNÉTICO PROPOSTO PARA O RECET [14].	33
FIGURA 11 REPRESENTAÇÃO DO NÚMERO DE TAPS CONFORME A OCORRÊNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO [14].	36
FIGURA 12 BLOCOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO S-DVR20.	38
FIGURA 13 BLOCO DO CIRCUITO PLL OU DETECTOR DE FASE E AMPLITUDE.	39
FIGURA 14 CIRCUITO EPLL ADOTADO PARA O MODELO.	40
FIGURA 15 BLOCO DE COMPARAÇÃO: ERRO RESULTA NA TENSÃO VTAP.....	40
FIGURA 16 BLOCO DE SELEÇÃO OU DECISÃO DE TAPS.	41
FIGURA 17 ESTÁGIO DE SELEÇÃO PARA ACIONAMENTO DE UM TAP QUALQUER.	43
FIGURA 18 MODELO ANALÍTICO DO AUTOTRANSFORMADOR DO RECET.	46
FIGURA 19 GRÁFICO DA TENSÃO DE COMPENSAÇÃO PARA SOBRE-TENSÃO MÁXIMA SUPORTÁVEL.....	47
FIGURA 20 TENSÕES VI E VREG PARA AFUNDAMENTO GRADATIVO DE TENSÃO VI: TODOS OS TAPS POSITIVOS ACIONADOS. ...	49
FIGURA 21 TENSÕES VI E VCOMP (VTAP) PARA AFUNDAMENTO GRADATIVO DE TENSÃO VI.	50
FIGURA 22 TENSÃO DE COMPENSAÇÃO VTAP: TAPS POSITIVOS.	50
FIGURA 23 PULSOS DE CONTROLE TSYY PARA TP01 A TP10.	51
FIGURA 24 PULSOS DE CONTROLE TSYY PARA TP11 A TP20.	52
FIGURA 25 TENSÕES VI E VREG PARA SOBRE-TENSÃO GRADATIVA DE VI: TODOS OS TAPS NEGATIVOS ACIONADOS.	53
FIGURA 26 TENSÕES VI E VCON (VTAP) PARA SOBRE-TENSÃO GRADATIVA DE VI.	54
FIGURA 27 TENSÃO DE COMPENSAÇÃO VTAP: TAPS NEGATIVOS.	55
FIGURA 28 PULSOS DE CONTROLE TSYY PARA TN01 A TN10.	55
FIGURA 29 PULSOS DE CONTROLE TSYY PARA TN11 A TN20.	56
FIGURA 30 MAGNITUDE DE TENSÃO NA SAÍDA DO PLL: SOBRETENSÃO (MVi) E TENSÃO REGULADA (MVR) TAP NEGATIVO	56
FIGURA 31 RELAÇÃO ENTRE O ERRO E A MAGNITUDE DO SINAL DE ENTRADA (P.U.).....	57
FIGURA 32 MAGNITUDE DE TENSÃO NA SAÍDA DO PLL: SOBRETENSÃO (MVi) E TENSÃO REGULADA (MVR) TAP POSITIVO ..	58
FIGURA 33 MODELO DE TRANSFORMADOR UMEC NO PSCAD.	60
FIGURA 34 MODELO DO RECET NO PSCAD.	62
FIGURA 35 MODELO DAS CHAVES ESTÁTICAS DO RECET NO PSCAD.	63
FIGURA 36 MODELO DO AUTOTRANSFORMADOR DO RECET NO PSCAD.....	64
FIGURA 37 ESTÁGIO DE CONTROLE PARA O TAP 0 (ZERO), MODELO EXPANDIDO.....	65
FIGURA 38 BLOCO DE SELEÇÃO DE TAPS COM PULSOS DOS TIRISTORES.	66
FIGURA 39 CIRCUITO DE DISPARO DAS CHAVES DO RECET	67
FIGURA 40 PULSOS DE SINCRONISMO PARA O MODELO EXPANDIDO DE UM S-DVR20	68
FIGURA 41 SOBRETENSÃO INSTANTÂNEA MÁXIMA PARA O MODELO EXPANDIDO	69
FIGURA 42 AFUNDAMENTO DE TENSÃO INSTANTÂNEO MÁXIMO PARA O MODELO EXPANDIDO.....	69
FIGURA 43 MAGNITUDE DA TENSÃO RASTREADA PELO PLL: DINÂMICA PODE SER MELHORADA.	70
FIGURA 44 PULSOS DE DISPARO DOS TIRISTORES PARA AFUNDAMENTO INSTANTÂNEO DE TENSÃO.	71
FIGURA 45 COMPENSAÇÃO MÁXIMA DO RECET: CASO EXTREMO.....	72

Índice de Tabelas

TABELA 1 NÍVEL DE COMPENSAÇÃO POR DEGRAU DE TENSÃO [25].	21
TABELA 2 COMBINAÇÕES DE <i>TAPS</i> DO RECET	29
TABELA 3 POSSIBILIDADES OU TABELA VERDADE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO RECET PARA O MODELO MATEMÁTICO [14].	34
TABELA 4 FAIXA DE TENSÃO DOS <i>TAPS</i> .	42

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

RT – Regulador de Tensão

RECET – Regulador de Tensão com Comutação Eletrônica de *TAPS*

LEMT – Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

VTCD – Variação Transitória de Curta Duração

UMEC – *Unified Magnetic Equivalent Circuit*

PSCAD – *Power System Computer Aided Design*

EMTDC – *Electromagnetic Transient Direct Current*

DSP – *Digital Signal Processor*

PLL – *Phase-Locked Loop*

E-PLL – *Enhanced Phase-Locked Loop*

S-DVR – *Step Dynamic Voltage Regulator*

TP – Transformador de Potencial

1. Introdução

Um importante indicador de crescimento e desenvolvimento de um país é a sua demanda de energia elétrica, uma vez que a energia elétrica está intimamente relacionada a vários setores da economia, além de contribuir diretamente para a qualidade de vida das pessoas. Um país que possui demanda crescente de energia demonstra, sobretudo, crescimento econômico e desenvolvimento.

Tão importante quanto o aumento da geração de energia elétrica, responsável por garantir o atendimento de uma demanda cada vez maior por energia, está o conceito de *qualidade de energia*. A qualidade de energia, em seu significado simplista, é o conjunto de condições que resultam em um bom fornecimento e uso da energia elétrica, ou seja, sem variações indesejáveis nos seus parâmetros elétricos. Dentre outros parâmetros, o conceito de qualidade de energia está intimamente ligado aos níveis de tensão supridos ao sistema de distribuição [12].

Vários fatores têm comprometido a estabilidade da tensão nos sistemas de distribuição, situação que pode ocasionar inúmeros problemas aos consumidores, sejam eles residenciais ou industriais. Uma alternativa para a solução de problemas relativos à variação de tensão é a utilização dos Reguladores de Tensão – RT. Os reguladores mais comumente utilizados no sistema elétrico são os reguladores eletromecânicos. Existem ainda os reguladores eletrônicos, menos comuns, e que possuem uma série de vantagens em relação aos reguladores eletromecânicos. Apesar das vantagens, os reguladores eletrônicos necessitam de um sistema de controle muitas vezes sofisticado, capaz de atuar em um tempo muito curto para compensação de variações de tensão de curta duração.

Neste trabalho será apresentada uma estratégia de controle para os reguladores eletrônicos de tensão conhecidos como S-DVR ou *Step Dynamic Voltage Regulator* [5]. O controle apresentado [1] tem como base a utilização de equações para a modelagem do sistema de controle de qualquer regulador tipo S-DVR, uma análise inédita na literatura relacionada. Com o conjunto de equações de modelagem, o controle de um regulador tipo S-DVR20 [1] [2] [3] [4] será apresentado, além de sua implementação em ambiente PSCAD/EMTDC. O S-DVR20, nomeado como projeto RECET ou Regulador de Tensão com Comutação Eletrônica de *TAPS*, é um projeto de pesquisa e desenvolvimento do Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão do grupo de Eletrônica de Potência da COPPE / UFRJ.

1.1 Estruturação do texto

No capítulo seguinte serão apresentados, resumidamente, os tipos de reguladores de tensão existentes na atualidade e sua classificação de acordo com as normas vigentes. O objetivo dessa parte é trazer informações sobre os tipos de reguladores mais utilizados no mercado, sendo um ponto de partida para a concepção do projeto RECET.

O capítulo 3 fará uma apresentação do RECET, seu princípio de operação e a sua concepção. Informações sobre a sua topologia e parâmetros nominais serão apresentadas, além de uma descrição básica do seu funcionamento.

O capítulo 4 apresentará uma modelagem matemática simplificada utilizada para o controle do regulador proposto. Serão apresentadas as equações de compensação do regulador e a teoria necessária para a implementação do sistema de controle. Serão apresentados os blocos que compõem o controle automático e, para concluir, será feita uma validação do modelo proposto, para os níveis desejados de compensação de tensão do S-DVR20.

O capítulo 5 apresentará a modelagem digital de um dispositivo S-DVR20 expandido, utilizando o controle automático validado no capítulo anterior. Serão apresentados os cálculos do circuito magnético deste regulador, as considerações de disparo das chaves de potência bem como peculiaridades e diferenças entre a outra implementação.

Finalmente o último capítulo é uma conclusão do que foi apresentado nesse trabalho. A conclusão vai sintetizar pontos importantes do trabalho e sugerir diretrizes para trabalhos futuros.

1.2 Motivação para o trabalho

O RECET é um projeto de pesquisa e desenvolvimento e, para tal, vislumbra o estudo e a produção de um protótipo a ser utilizado para solucionar um problema específico da Engenharia Elétrica. Esse desafio inclui uma infinidade de outros desafios menores, inerentes à realização de um projeto inovador. O conhecimento adquirido, além da superação dos desafios, representa um desenvolvimento importante na carreira de um Engenheiro.

Acredita-se que o estudo desenvolvido fortificará bases para o exercício da profissão de Engenheiro Eletricista e a continuidade dos trabalhos no meio acadêmico e técnico.

1.3 Objetivo

O objetivo do trabalho é a implementação de uma nova proposta de controle digital para um regulador S-DVR20, nomeado RECET, a fim de validar sua modelagem matemática e possibilitar a sua implementação em um protótipo. Esse modelo digital do controle automático deve ser adaptado para o controle automático de um modelo expandido do regulador, após sua validação. O modelo digital expandido deve levar em consideração aspectos referentes ao circuito eletromagnético do regulador e a dinâmica de chaveamento que deverá ocorrer com os dispositivos SCR.

Para que isso fosse possível, se fez necessário à ordenação de outros objetivos subsequentes, a saber:

- Entendimento dos princípios, operação e topologia do RECET¹;
- Fundamentos do controle e sua estruturação.

Finalmente, com os objetivos acima descritos, deu-se início a implementação do modelo digital matemático.

1.4 Contextualização

O sistema elétrico brasileiro é basicamente dividido em três grandes blocos:

- Sistema de Geração de Energia Elétrica:
 - No sistema de geração os vários recursos naturais e tecnológicos são utilizados para gerar a potência elétrica a ser transmitida. O sistema de geração é majoritariamente em tensão alternada, 60 Hz.
- Sistema de Transmissão de Energia Elétrica:

¹ O RECET é um caso específico de um regulador S-DVR20. Dessa forma, neste texto os dois serão citados como o mesmo dispositivo.

- A transmissão é a parte do sistema elétrico responsável por interconectar a geração e o sistema de distribuição. A transmissão é majoritariamente feita em tensão alternada, embora alguns trechos disponham de transmissão CC.

- Sistema de Distribuição de Energia Elétrica:

- O sistema de distribuição é responsável em suprir a energia entregue pelo sistema de transmissão ao consumidor final, em níveis de tensão reduzidos.

O sistema de distribuição é bastante complexo, sendo composto por pequenas redes de energia conectadas. Esse sistema é subdividido em dois ramos, como segue:

- Sistema de Distribuição Primário ou Redes de Média Tensão:
 - Circuitos Trifásicos a três fios, em faixas de 15, 25 ou 35 kV;
- Sistema de Distribuição Secundário ou Redes de Baixa Tensão:
 - Circuitos Trifásicos a quatro fios e consumidor com potência instalada inferior a 50 kW.

O contexto desse trabalho está situado, portanto, no Sistema de Distribuição e, mais especificamente, no Sistema de Distribuição Primário de Energia Elétrica.

A proposição de um regulador de tensão a ser inserido no sistema de distribuição primário é uma necessidade de se melhorar o fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias, devido fundamentalmente aos problemas de variações de tensão de curta duração [2].

2. Os Reguladores de Tensão

O controle de tensão do sistema de distribuição visa propiciar aos consumidores de energia tensões dentro dos limites adequados às suas necessidades, tendo em vista que os equipamentos, eletrodomésticos, máquinas e plantas industriais são projetados para suportar certa variação de tensão em torno de um valor nominal, sem que a operação dos mesmos sofra algum prejuízo. A variação de tensão de suprimento dos consumidores logicamente dependerá da situação operacional do sistema de distribuição, considerando a localização do consumidor no sistema da concessionária.

A regulação de tensão está relacionada ao regime permanente nos sistemas de distribuição de energia elétrica [12]. Essas variações na amplitude de tensão estendem-se por longos períodos de tempo, sendo caracterizadas por fenômenos que pode ocorrer de forma cíclica ou devido a algum problema com a rede elétrica. A regulação de tensão é definida como a diferença entre a tensão máxima e mínima em determinados pontos do sistema.

Ao longo do tempo foram desenvolvidos diversos métodos que podem ser utilizados visando obter a regulação de tensão dentro dos limites estabelecidos nas normas, conforme citado em [14]. Os principais métodos são:

- Transferência de cargas para novos alimentadores;
- Aplicação de capacitores em subestações e/ou em alimentadores de distribuição;
- Aumento da bitola dos condutores ou número de fases em seções dos alimentadores;
- Instalação de novas subestações e alimentadores;
- Elevação do nível da tensão primária;
- Balanceamento das cargas nos alimentadores;
- Utilização de reguladores de tensão em subestações ou ao longo de alimentadores da rede de distribuição.

O último método apresentado é conhecido com Regulador de Tensão – RT Eletromecânico. Esses equipamentos vêm sendo amplamente utilizados e propiciam um bom desempenho na regulação de tensão em regime permanente, por sua vez, os reguladores de tensão com comutador eletrônico de *taps* apresentam uma dinâmica muito melhor como pode ser visto em [11] e [13].

O RT eletromecânico é um método convencional de regulação de tensão que pode ser caracterizado pela sua dinâmica lenta de compensação, fato que o torna impróprio para a compensação de variações transitórias de curta duração. Este tipo de problema tem comprometido a qualidade de energia em muitas situações, contribuindo para os avanços técnicos obtidos com os reguladores eletrônicos de tensão.

2.1 Classificação

Em [18], existe a especificação de dois tipos de reguladores de tensão por degraus: o tipo A e o tipo B.

Nesta seção será apresentada uma breve descrição destes reguladores, bem como algumas terminologias e definições utilizadas. Também serão abordadas suas limitações de operação quanto às exigências atuais por melhor qualidade de energia.

A concepção básica do funcionamento deste equipamento é similar ao de um autotransformador, no qual são considerados *taps* variáveis que possibilitam a comutação em carga. Sendo assim, além do acoplamento magnético é estabelecido um acoplamento elétrico. Neste caso, uma parte da potência é transferida eletromagneticamente (potência própria) e outra parte é transferida por meio de condução (potência transformada), sendo que esta última é tomada como base para o desenvolvimento do projeto do Regulador de Tensão.

Em termos de padrões estabelecidos em [18], dois tipos de Reguladores de Tensão podem ser citados:

- i. Tipo A: O enrolamento de excitação é localizado em paralelo com a fonte, fazendo com que o enrolamento de excitação seja submetido diretamente às variações de tensão na fonte. Neste tipo de configuração, o regulador é especificado como sendo de excitação variável. A Figura 1 ilustra o diagrama esquemático simplificado de um Regulador de Tensão do Tipo A.
- ii. Tipo B: O enrolamento de excitação é localizado no lado da carga, fazendo com que o mesmo não seja submetido às variações da tensão na fonte. Para este tipo de configuração, o regulador é especificado como sendo de excitação constante. A Figura 2 mostra o diagrama esquemático simplificado de um Regulador de Tensão do Tipo B.

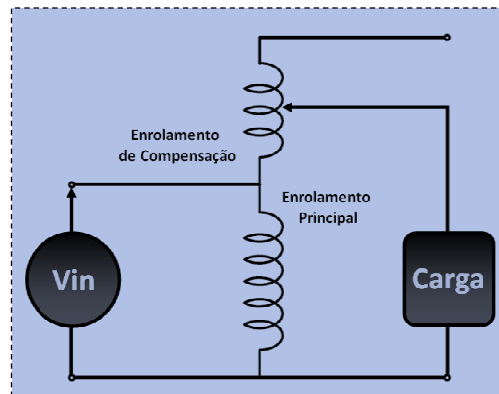


Figura 1 Esquemático do Regulador de Tensão Tipo A.

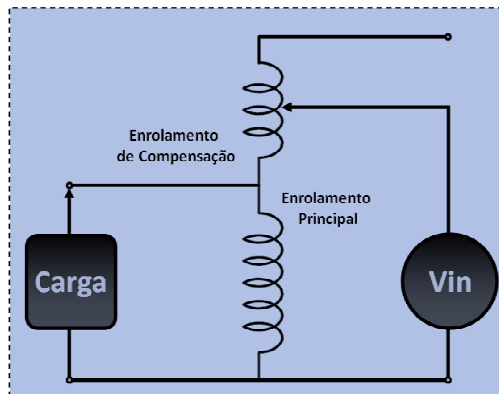


Figura 2 Esquemático do Regulador de Tensão Tipo B.

Neste trabalho em particular, o estudo será direcionado para a topologia do regulador Tipo A, servindo de base para o estudo do controle em um dispositivo formado pelas duas topologias. Vale ressaltar que a topologia B é essencialmente mais complexa em termos de controle, visto que a tensão regulada é dependente da tensão de entrada do regulador. A topologia Tipo B será analisada em oportunidades futuras.

A tecnologia de Reguladores de Tensão com Comutação Eletromecânica de *Taps* é muito utilizada há várias décadas e, portanto, bem conhecida no mundo inteiro. Ao longo do tempo, o projeto destes equipamentos modificou-se, de modo a atender normas gerais de operação, algumas das quais são estabelecidas por órgãos internacionais, como se verifica em [19]. No caso do Brasil, a ANEEL é o órgão regulamentador da qualidade de energia, estabelecendo os limites dos níveis de tensão

de uma rede em regime permanente pela resolução 505/2001 [10], de modo que, um determinado equipamento pode ser comercializado com algum mecanismo ou dispositivo específico que depende do fabricante, mas de modo geral segue-se uma metodologia de construção que é similar em todo o mundo [20].

Atualmente, no Brasil, são muito utilizados os reguladores do tipo B que funcionam em óleo isolante e que permitem 33 derivações: 16 para cima (elevador), 16 para baixo (redutor) e a posição neutra. Possuem capacidade para regular a tensão de linha com desvios de até $\pm 10\%$ com degraus de 0.625% da tensão nominal cada [21]. São munidos de um sistema eletrônico que monitora as tensões de linha e comanda o comutador (*tap-changer*) para o *tap* (derivação) que forneça o nível de tensão desejado. O acionamento do comutador é feito através de um motor, o que faz com que a comutação entre *taps* seja feita de modo sequencial. Isto limita o tempo de resposta em torno de 5,0 a 8,0 s, o que é insuficiente para proteger cargas sensíveis a ocorrências VTCD's.

Outro aspecto importante a se considerar quanto à utilização de um regulador de tensão com comutador mecânico é a sua manutenção, que é muito crítica [20], [22], [24]. Ela é um fator preponderante para o desempenho, confiabilidade, tempo e custos de operação. As causas de deterioração do equipamento podem ser as seguintes:

- i. ambientais, devido à exposição à chuva e sol;
- ii. “stresses” térmicos causados pelos ciclos de operação de carga (*load cycling*);
- iii. umidade interna e perda de óleo;
- iv. mecânicas, por falhas no sistema de ventilação, motor, e outros elementos que compõe o circuito eletromecânico do comutador de *taps*. Entre essas, as falhas mais graves são as mecânicas, devido ao desgaste das partes móveis [23].

O comutador realiza o chaveamento da corrente de carga para o enrolamento do transformador através de uma seleção de *taps*. Os contactos elétricos que efetuam este chaveamento são encapsulados em óleo isolante e, portanto, é difícil de identificar a condição de operação do comutador, de maneira direta e não-invasiva, sem perturbar o sistema.

A necessidade frequente de manutenção, que quando frequentes demais podem também induzir falhas, e da redução de seus custos, motivou o desenvolvimento de diversos estudos e procedimentos para monitorar o sistema de comutação de *taps*, de modo a ter-se uma estimativa do estado de funcionamento do mesmo e, assim, otimizar os intervalos de manutenção.

Estes procedimentos envolvem monitoramento contínuo de correntes e tensões do transformador, detecção de vibrações mecânicas, análises termográficas e de amostras separadas do óleo, existente no compartimento do transformador e no compartimento do comutador, e estudos estatísticos para previsão de falhas.

Ressalta-se que toda esta metodologia de operação e manutenção é fruto de décadas de estudos e observações minuciosas de falhas em equipamentos quando em operação no campo. Essas informações indicam que o trabalho de manutenção envolve tempo considerável, custos e complexidades.

O primeiro regulador de tensão com comutador eletrônico de *tap* no mundo foi colocado em operação na Noruega em 1986 pela ABB Components [13]. Desde então, surgiram diversas propostas que envolvem diferentes projetos de transformador, conexões de chaves e técnicas de controle para fornecer o nível de tensão desejado à carga.

Desde então, diversas propostas têm procurado resolver alguns problemas tais como, minimização das perdas de condução pelas chaves, aumento do número de degraus (*steps*) de tensão disponível, aumento da rapidez na resposta à faltas, e redução de custos. A seguir serão apresentadas algumas destas propostas.

A Figura 3 mostra um diagrama esquemático de uma fase de um regulador de tensão com dispositivos semicondutores baseados em conexão antiparalela de SCR's [25]. O transformador é composto de um enrolamento primário e de um enrolamento secundário com vários *taps* e o comutador eletrônico é composto de 8 chaves CA (G1-G8) que proporcionam 7 degraus de regulação. A cada meio-ciclo o valor eficaz da tensão no primário é calculado e comparado com um valor de referência. Se acontecer alguma perturbação no lado da alimentação, por exemplo, um afundamento de tensão, o sistema de controle aciona um conjunto de pares de tiristores de modo a ajustar a tensão no lado da carga para o nível adequado.

O tempo de resposta para que o ajuste da tensão ocorra é em torno de meio ciclo, pois envolvem os tempos de acionamento dos tiristores (*turn-on* e *turn-off*).

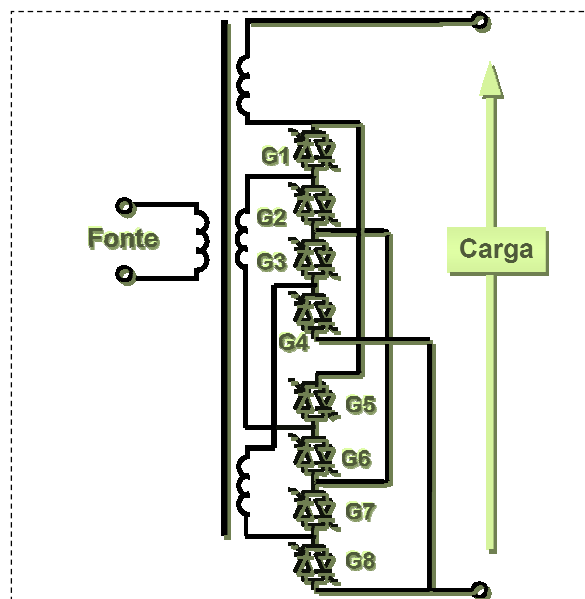


Figura 3 Diagrama esquemático monofásico de um regulador de tensão com chaves estáticas CA baseadas em conexão antiparalela de SCR's [14].

A identificação do conjunto de pares de tiristores é feita através de uma tabela (*look-up tabela*) que relaciona o degrau (*step*) ou percentual de tensão a ser corrigido e as chaves a serem acionadas para realizar a conexão série de enrolamentos. Se for um afundamento ou uma sobretensão, os enrolamentos deverão somar-se ou opor-se ao enrolamento principal.

O chaveamento do *tap* deve ocorrer durante o cruzamento pelo zero da corrente de linha, como uma maneira de evitar-se a ocorrência de distorção harmônica. A Tabela 1 mostra os percentuais de tensão a serem corrigidos e as correspondentes chaves a serem acionadas.

Tabela 1 Nível de compensação por degrau de tensão [25].

Sobretensão/Afundamento (%)	Número de Degraus de Compensação	Tiristores a serem ativados	Tensão de Saída (na Carga)
+7.5	- 3	G5, G2, G7, G4	$V_s * (N2-3S)/N1$
+ 5.0	- 2	G1, G2, G7, G4	$V_s * (N2-2S)/N1$
+2.5	- 1	G5, G2, G7, G8	$V_s * (N2-1S)/N1$
0	sem regulação	G1, G2, G7, G8	$V_s * (N2)/N1$
- 2.5	+1	G1, G6, G7, G8	$V_s * (N2+1S)/N1$
- 5.0	+ 2	G1, G2, G3, G8	$V_s * (N2+2S)/N1$
- 7.5	+ 3	G1, G6, G3, G8	$V_s * (N2+3S)/N1$

Pode ser observado que com este tipo de configuração, para que se tenha maior número de degraus de compensação, o transformador deve possuir maior número de *taps* e, conseqüentemente, mais chaves devem ser adicionadas.

Em dois trabalhos similares como se verifica em [26] e [27], é desenvolvido um regulador baseado em tiristores e no controle tipo DCM – *Discrete Cycle Modulation*, com o intuito de reduzir-se o número de tiristores. Com o controle DCM, são selecionados dois níveis de tensão proporcionados pelos *taps* do transformador, uma maior e outra menor.

É aplicada uma modulação por número de ciclos discretos no nível maior de tensão seguida por um número de ciclos no nível menor de tensão. Cria-se, então, uma tensão intermediária entre os dois níveis. Com isto, um maior número de níveis de tensão eficaz de compensação podem ser obtidos, além dos fornecidos apenas pelos *taps* do transformador, e assim procura-se atingir um controle mais contínuo da tensão sem a adição de mais enrolamentos e mais chaves. Porém a estratégia de controle é de maior complexidade e pode gerar sub-harmônicos da frequência de linha que, por sua vez, podem produzir *flickers*, conforme é reportado em [28].

Nesta referência [28], é proposta uma otimização no número de *taps* e chaves, que compõe a topologia do regulador, baseada numa diferente e complexa disposição de enrolamentos e de conexões de chaves. Com esta proposta os autores sustentam que com 12 *taps* e 12 chaves (arranjos de chaves bidirecionais com tiristores) obtém-se 63 degraus de tensão, tendo sempre 6 chaves em série a cada instante. Já em [25], com 8 *taps* e 12 chaves (bidirecionais) obtém-se apenas 31 degraus (incluindo o nível sem regulação), porém com 4 chaves em série no caminho de corrente, o que implica em menores perdas de condução.

Em [29], é proposta uma topologia de regulador com chaves eletrônicas do tipo tiristor GTO. Neste caso, porém, o comutador é uma combinação de chaves a vácuo, acionadas por atuadores (motores) especiais, com as chaves eletrônicas. É dito, então, que o comutador mecânico é assistido por chave eletrônica. A proposta é reduzir as perdas de condução dos dispositivos semicondutores com o uso de chaves mecânicas, mas ainda introduzindo controles eletrônicos para maior rapidez do sistema e manutenção mais simples. O resultado desta combinação, para um transformador de 240 MVA e com 19 *taps*, são tempos de resposta que podem variar entre 80 ms (mudança de um *tap*) e 800 ms (mudança entre os 19 *taps*). Nesta situação, um regulador com comutador totalmente mecânico atuaria em 100 segundos.

Na Figura 4 é ilustrado de maneira simplificada um comutador mecânico assistido por chave eletrônica, conforme proposto em [30]. Para maior clareza, colocou-se também uma ilustração de um comutador totalmente mecânico.

Durante uma mudança de *tap*, a transferência da corrente de fase de um *tap* para o outro é realizada pelas chaves estáticas A e B. Quando uma chave estática é ativada, segue-se a transferência de corrente da mesma para a correspondente chave a vácuo conectada em paralelo. Desta forma, não ocorre perda de condução pela chave estática. Após a mudança de *tap*, a outra chave estática é desconectada do transformador através do seletor de *tap*, sem ocorrência de surto de tensão. Portanto, nesta proposta, o seletor de *tap* mecânico é preservado, mas a chave direcionadora totalmente mecânica da Figura 4 é substituída por uma combinação de chaves mecânicas com eletrônicas da Figura 5. Isto evita a ocorrência de arco voltaico durante as mudanças de *tap* e, conseqüentemente, diminuir a tempo frequência de manutenção. É reportado que para um transformador de 240 MVA com 19 *taps* uma varredura completa entre todos os *taps* tem duração de 1,5 segundos.

Pode ser observado nestas configurações com comutador de *tap* assistido por chaves eletrônicas, que os tempos de resposta obtidos são competitivos quando comparados com a resposta de um *tap* totalmente mecânico, porém são ainda muito lentos para atender critérios de qualidade de energia mais exigentes.

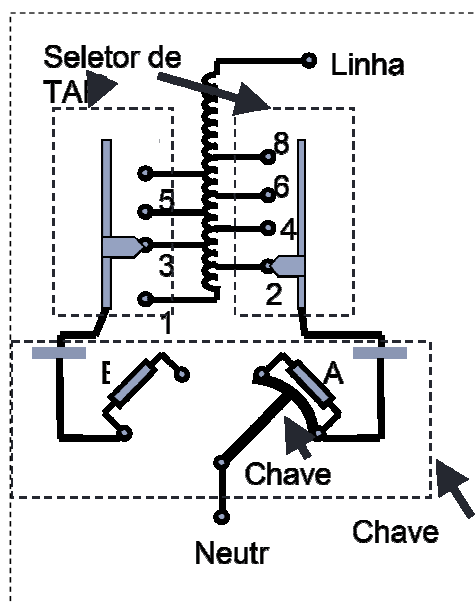


Figura 4 Comutador mecânico assistido por chave eletrônica [14].

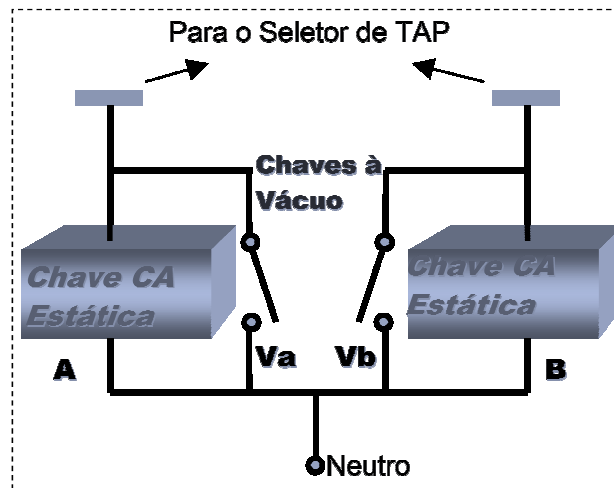


Figura 5 Seletor de TAP com chaves estáticas CA [14].

Por fim, após uma análise das topologias encontradas na pesquisa bibliográfica, optou-se pela desenvolvida por [25]. Essa topologia elimina totalmente o comutador mecânico, o que resulta em uma das melhorias significativas no RT, sendo elas: tempo menor na troca de *taps* (onde o tempo teórico seria de meio ciclo de onda); todos os *taps* tem o mesmo tempo de troca (isso se deve ao fato do dispositivo comutador não ser sequencial) e diminuição da necessidade de manutenção.

3. RECET

3.1 Princípios do RECET

O Regulador de Tensão com Comutação Eletrônica de *TAPS* ou simplesmente RECET [2], é um regulador de tensão em desenvolvimento no Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão da COPPE / UFRJ, sendo caracterizado como um projeto de pesquisa e desenvolvimento de qualidade de energia elétrica.

O RECET é um regulador de média tensão com características operativas peculiares. Diferentemente da maioria dos reguladores eletromecânicos que se encontra em operação no sistema de distribuição, o RECET possui comutação eletrônica, ou seja, a comutação de *taps* é feita utilizando-se dispositivos semicondutores de potência, seguindo a proposta de [25]. No caso deste regulador, utilizam-se os tiristores, pois atualmente no mercado são dispositivos que possuem maior capacidade de suportar corrente e tensões de operação.

O tempo de comutação deste tipo regulador pode ser muito reduzido, como demonstrado no capítulo anterior. A utilização dos tiristores na comutação de *taps* possibilita inclusive evitar as variações transitórias de curta duração, um problema indesejável e de difícil solução dentro dos conceitos de qualidade de energia. Os reguladores eletromecânicos possuem essa limitação, além de sofrerem de maneira mais acentuada com o desgaste, característica inerente a dispositivos mecânicos.

Outra característica interessante e inerente ao RECET é a possibilidade de compensar diversos níveis de tensão. Ao todo o regulador possui 40 níveis de compensação de tensão, sendo metade níveis de elevação e a outra metade níveis de redução. Dessa forma o dispositivo é capaz de regular a tensão até um dado limite em 20 degraus de tensão definidos, tanto para afundamentos na tensão de entrada quanto para sobretensões. Por esta característica, o RECET pode ser também chamado de um regulador tipo S-DVR20 [1], sendo caracterizado por ser um regulador simétrico.

Estruturalmente, o RECET é composto por um conjunto de tiristores de comutação e um autotransformador, responsável por disponibilizar as relações de transformação de tensão do dispositivo através dos seus *taps*.

3.2 Parâmetros Nominais

O RECET opera sob as condições nominais descritas a seguir.

- Potência de aproximadamente 400 kVA;
- Corrente de 50 A;
- Tensão fase-neutro de 7.967 V.

Sob as condições descritas, o equipamento deve ser capaz de garantir a regulação de tensão dentro de seus limites especificados, além de fornecer a corrente nominal de carga acima descrita. Para que isso ocorra, o RECET precisa dispor de um sistema de controle automático capaz de comutar os *taps* corretamente, a partir do valor de tensão de entrada a ser compensado.

O RECET deverá ser inserido no sistema de distribuição primário, operando de acordo com os valores nominais descritos. O sistema de controle é responsável por coordenar os *taps* do regulador de maneira a garantir a regulação de tensão. A tensão regulada deve estar dentro dos limites especificados no projeto do regulador, respeitando seus limites operacionais.

O sistema de controle automático deve ser capaz de dar autonomia ao regulador, ou seja, torná-lo capaz de se auto-regular tendo em vista as possibilidades de tensão de entrada previstas². A tensão de entrada será medida na prática com o uso de um Transformador de Potencial – TP, sendo um parâmetro de entrada real para o sistema de controle.

A partir do valor da tensão de entrada fornecida ao sistema de controle, esse deverá acionar um dos 40 estágios de compensação do regulador, fazendo com que a tensão regulada esteja sempre próxima do valor nominal de operação. Apesar de ser um conceito simples, sua implementação gera uma série de dificuldades. O objetivo desse trabalho é propor uma implementação de um sistema de controle para o RECET baseado em sua modelagem matemática, a fim de simplificar a implementação mais completa onde são analisadas as características elétricas do regulador e a dinâmica de acionamento dos dispositivos SCR. Após a validação dessa implementação, este sistema será utilizado para o controle de um dispositivo modelado considerando os parâmetros elétricos do regulador, como base para aperfeiçoamento em trabalhos futuros.

² Tensão de entrada não prevista é uma diferença de potencial acima dos limites de compensação do regulador.

3.3 Topologia

Tomando como base os valores nominais do dispositivo, foi possível idealizar a operação do RECET, como ele deveria trabalhar e os blocos específicos que o constituem, separadamente.

Por se tratar de um regulador de tensão eletrônico, espera-se que possua dois blocos principais: comutador eletrônico de *taps* (ou chaves estáticas CA) e um autotransformador. A seleção de *taps* consiste de um conjunto de chaves de potência que farão a comutação dos *taps* segundo uma lógica de controle. Como dito anteriormente, as chaves de potência são os tiristores, dispostos em pares antiparalelos. O arranjo de tiristores em antiparalelo são também chamados de chaves estáticas CA [2], devido à capacidade de condução de corrente elétrica nos dois sentidos. O autotransformador é um transformador de um único enrolamento, responsável por oferecer as relações de transformação necessárias. Maiores detalhes sobre a topologia serão apresentados nesse item.

Uma necessidade do projeto foi que o regulador pudesse oferecer uma compensação de 12,5% máxima simétrica, tensão de compensação em valor absoluto muito próxima de 1,0 kV. Dessa forma o dispositivo deveria suprir uma regulação de 0.125 p.u de tensão máxima tanto para afundamentos de tensão quanto para sobretensões. A resolução da ANEEL [10] prevê degraus de tensão para reguladores de 0.625%, o que obrigou o dispositivo a trabalhar com uma faixa de 20 *taps* negativos e 20 *taps* positivos, além de um *tap* sem regulação para o caso de uma tensão de entrada nominal. Logo o RECET deve operar com 41 estágios, sendo 1 (um) estágio sem compensação e 40 estágios com compensação, sendo metade positiva e a outra metade negativa.

Em [25] são propostas três topologias de *Step Dynamic Voltage Regulator* (S-DVR): o S-DVR6, S-DVR8 and S-DVR12, com capacidade de compensar afundamentos e elevações de tensão em até meio ciclo da frequência principal. A topologia *Step Dynamic Voltage Regulator* serviu de ponto de partida para a concepção do RECET, como pode ser constatado em [14].

A estrutura do comutador é composta por 48 células de tiristores em antiparalelo conectadas em série, totalizando um conjunto de 96 chaves semicondutoras. Esta conexão possibilita a variação dos 41 *taps* previstos. Na simulação cada célula de tiristores equivale a 4 células reais, assim tem-se apenas 12 células de tiristores.

O funcionamento do comutador eletrônico é baseado na escolha do conjunto de chaves que irão conduzir por um intervalo de tempo determinado, regulando a tensão da carga. Para que a regulação da tensão seja obtida, basicamente, são determinadas um total de quatro células que irão conduzir durante um ciclo completo. Sendo que quatro tiristores conduzirão no semi-ciclo positivo enquanto os outros quatro tiristores restantes conduzirão no semi-ciclo negativo, permitindo assim que a carga seja alimentada durante o ciclo completo.

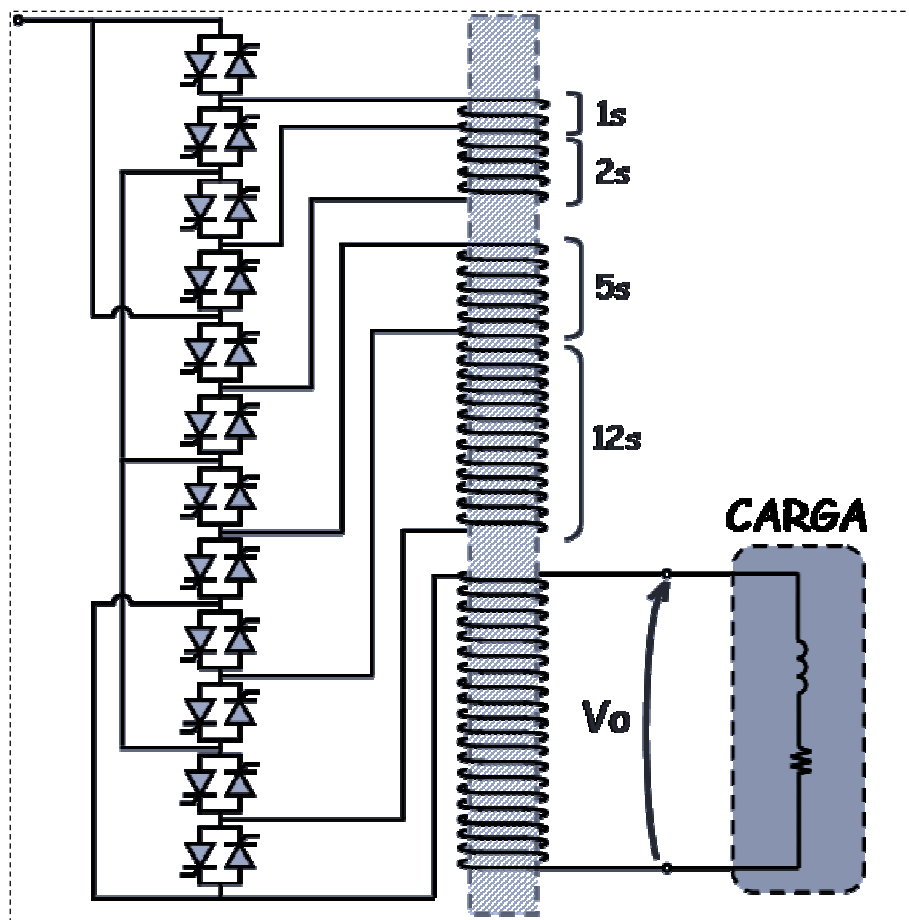


Figura 6 Topologia do comutador eletrônico do RECET (tipo B) [1].

Devido ao número máximo de degraus, positivo e negativo, serem de vinte, a relação de transformação das bobinas foi definida de forma a garantir que a excursão do menor nível até o maior nível de compensação ocorra gradualmente de acordo com o menor nível permitido. Sendo assim a relação de transformação da primeira bobina (1s) obrigatoriamente terá que ser de 0,625%, conforme estabelecido como degrau mínimo. A Figura 6 ilustra a topologia do RECET, com seus 12 pares de tiristores.

Visando atender estas premissas, foi estabelecido em [14], que as relações das bobinas fossem as seguintes: 0,625%(1s), 1,25%(2s) 3,125%(5s) 7,5%(12s), ou T_1 , T_2 , T_5 e T_{12} respectivamente. Com este conjunto de bobinas, é possível obter excursões de tensão do ponto mínimo ($\pm 0,625\%$) até o ponto máximo ($\pm 12,5\%$) de compensação, sempre garantindo que as mesmas ocorram em degraus de no máximo 0,625%. A Tabela 2 mostra a tensão de entrada (coluna V_{entrada}) com a qual a amplitude é calculada no intuito de definir o conjunto de quatro chaves que serão disparadas (coluna Tiristores).

Tabela 2 Combinações de *taps* do RECET

	Ventrada (V)	Razão ($V_{\text{saída}} / V_{\text{entrada}}$)	Tiristores	Steps	Lógica de Compensação Direta
Elevação de Tensão	8.96288	88.889%	(G1G6G7G12)	20	12 + 5 + 2 + 1
	8.91308	89.385%	(G4G6G7G12)	19	12 + 5 + 2
	8.86329	89.888%	(G1G3G7G12)	18	12 + 5 + 1
	8.81349	90.395%	(G1G2G7G12) (G5G6G7G12)	17	12 + 5
	8.76370	90.909%	(G2G4G7G12)	16	12 + 5 - 1
	8.71391	91.429%	(G3G5G7G12)	15	12 + 5 - 2
	8.66411	91.954%	(G4G6G10G12)	14	12 + 2
	8.61432	92.486%	(G1G3G10G12)	13	12 + 1
	8.56453	93.023%	(G1G2G10G12) (G5G6G10G12)	12	12
	8.51473	93.567%	(G2G4G10G12)	11	12 - 1
	8.46494	94.118%	(G3G5G10G12)	10	12 - 2
	8.41514	94.675%	(G2G5G10G12)	9	12 - 2 - 1
	8.36535	95.238%	(G1G6G7G9)	8	5 + 2 + 1
	8.31556	95.808%	(G4G6G7G9)	7	5 + 2
	8.26576	96.386%	(G1G3G7G9)	6	5 + 1
	8.21597	96.970%	(G1G2G7G9) (G5G6G7G9)	5	5
	8.16618	97.561%	(G2G4G7G9)	4	5 - 1
	8.11638	98.160%	(G1G6G7G8) (G1G6G11G12)	3	1 + 2
	8.06659	98.765%	(G4G6G7G8) (G4G6G11G12)	2	2
	8.01679	99.379%	(G1G3G7G8) (G1G3G11G12)	1	1
Afundamento de Tensão	7.96700	100.000%	(G1G2G7G8) (G1G2G11G12)	0	0
	7.91721	100.629%	(G2G4G7G8) (G2G4G11G12)	-1	-1
	7.86741	101.266%	(G3G5G7G8) (G3G5G11G12)	-2	-2
	7.81762	101.911%	(G2G5G7G8) (G2G5G11G12)	-3	-1 - 2
	7.76783	102.564%	(G1G3G8G10)	-4	-5 + 1
	7.71803	103.226%	(G1G2G8G10) (G5G6G8G10)	-5	-5
	7.66824	103.896%	(G2G4G8G10)	-6	-5 - 1
	7.61844	104.575%	(G3G5G8G10)	-7	-5 - 2
	7.56865	105.263%	(G2G5G8G10)	-8	-5 - 2 - 1
	7.51886	105.960%	(G1G6G9G11)	-9	-12 + 2 + 1
	7.46906	106.667%	(G4G6G9G11)	-10	-12 + 2
	7.41927	107.383%	(G1G3G9G11)	-11	-12 + 1
	7.36948	108.108%	(G1G2G9G11) (G5G6G9G11)	-12	-12
	7.31968	108.844%	(G2G4G9G11)	-13	-12 - 1
	7.26989	109.589%	(G3G5G9G11)	-14	-12 - 2
	7.22009	110.345%	(G4G6G8G11)	-15	-12 - 5 + 2
	7.17030	111.111%	(G1G3G8G11)	-16	-12 - 5 + 1
	7.12051	111.888%	(G1G2G8G11) (G5G6G8G11)	-17	-12 - 5
	7.07071	112.676%	(G2G4G8G11)	-18	-12 - 5 - 1
	7.02092	113.475%	(G3G5G8G11)	-19	-12 - 5 - 2
	6.97113	114.286%	(G2G5G8G11)	-20	-12 - 5 - 2 - 1

A razão (coluna Razão $V_{\text{saída}}/V_{\text{entrada}}$) representa o nível de compensação que será necessário em cada caso em particular. O *Steps* (coluna Steps) quantifica o número de degraus que serão utilizados em cada situação, enquanto a coluna Lógica de Compensação Direta apresenta de que forma as bobinas serão interligadas entre si.

Vale reforçar que, conforme Figura 6, as compensações 1s e 2s, bem como 5s e 12s fazem parte da mesma bobina.

4. Implementação e Validação do Modelo Matemático

4.1 Modelagem Analítica de um Regulador tipo S-DVR

Após estudar a topologia e os parâmetros do dispositivo, conforme descrito no capítulo anterior, a etapa seguinte é a modelagem desse dispositivo com objetivo de sua implementação digital.

A modelagem do dispositivo passa pelo entendimento e a descrição do seu funcionamento, ou seja, com base no que se deseja obter, criar um conjunto de premissas, simplificações, cálculos e representações que visam descrever da melhor maneira possível a operação e o funcionamento do dispositivo em questão. No caso dos reguladores tipo S-DVR, a modelagem encontrada nas literaturas relacionadas, basicamente [5] e [6], constituem modelos precisos, porém que dificultam a implementação do sistema de controle, ou seja, não há um conjunto de dados ou equações que permitam implementar de maneira simples um sistema de controle automático.

Em [1], é proposta uma modelagem matemática para o caso específico dos reguladores tipo S-DVR, com objetivo de simplificar a implementação do sistema de controle do dispositivo. Esta modelagem é composta basicamente por um conjunto de equações analíticas do S-DVR, podendo essas equações serem utilizadas portando para qualquer tipo de regulador S-DVR, com N estados de compensação. Como pode ser visto em [14], o controle do S-DVR20 pode ser modelado através de sua topologia, como será apresentado nos parágrafos seguintes.

Tomando como base a topologia do S-DVR20, já apresentada no capítulo 3, é possível chegar a equações importantes de regulação. O modelo digital de controle está totalmente relacionado à análise topológica do regulador. Como as equações deduzidas em [14] traduzem quantitativamente a regulação do RECET, essas equações serão chamadas de *equações de transferência* do regulador.

As equações de transferência facilitam enormemente a implementação do controle, pois dispensa-se o modelo eletromagnético do regulador e somente as relações de compensação são utilizadas, podendo-se analisar o controle sem levar em consideração não-linearidades do sistema, como por exemplo o disparo dos tiristores.

Como descrição em [14], “inicialmente parte-se de que a tensão regulada V_{reg} é dada pela Equação 1, sendo a soma da tensão de entrada ou não regulada V_i com a tensão de regulação ou tensão dos *taps* V_{tap} , conforme pode ser evidenciado na Figura 7”.

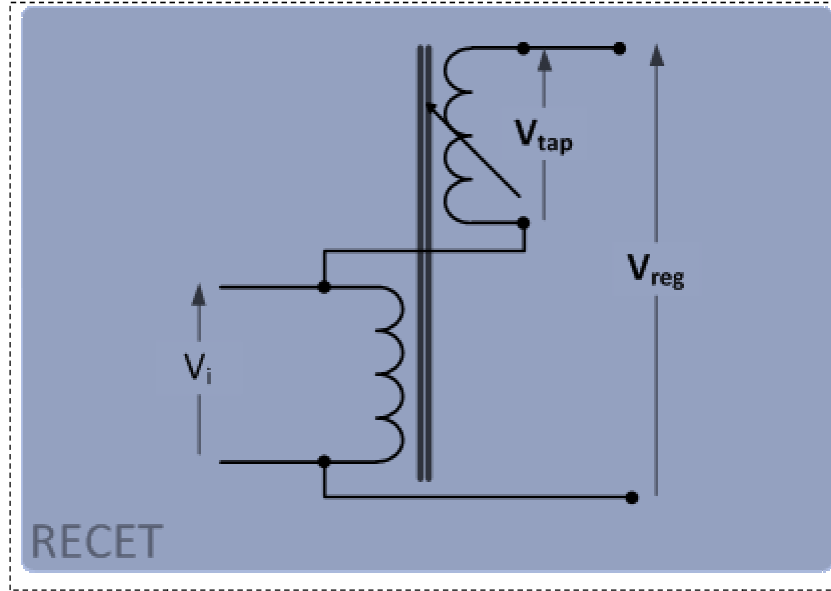


Figura 7 Arranjo topológico do RECET [14].

$$V_{reg} = V_i + V_{tap} \quad \text{Equação 1 [14]}$$

Como o RECET pode operar como um regulador do Tipo A ou Tipo B tem-se duas formulações diferentes para V_{tap} , com pode ser visto na Equação 2 e Equação 3.

$$V_{tap} = f(V_i) \quad \text{Equação 2 [14]}$$

$$V_{tap} = f(V_{reg}) \quad \text{Equação 3 [14]}$$

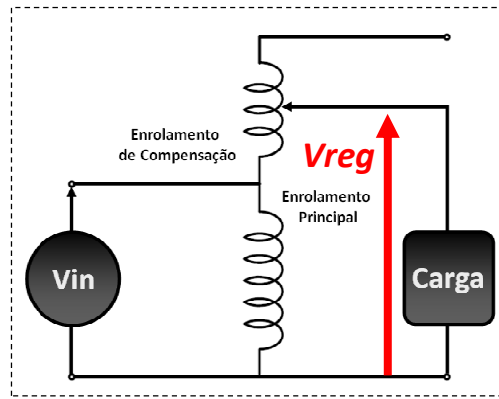


Figura 8 Regulador de Tensão do Tipo A.

Na Equação 2 verifica-se que a V_{tap} é função da tensão de entrada, ou seja, da tensão não regulada V_i . Isso ocorre quando o regulador de tensão tem o enrolamento de excitação alimentado pela tensão não regulada, nesse caso tem-se o regulador do Tipo A, ver Figura 8. Já nos reguladores do Tipo B, conforme pode ser visto na Figura 9, a tensão V_{tap} é função da tensão regulada V_{reg} , isso se deve ao fato do enrolamento de excitação ser alimentado pela tensão regulada [14].

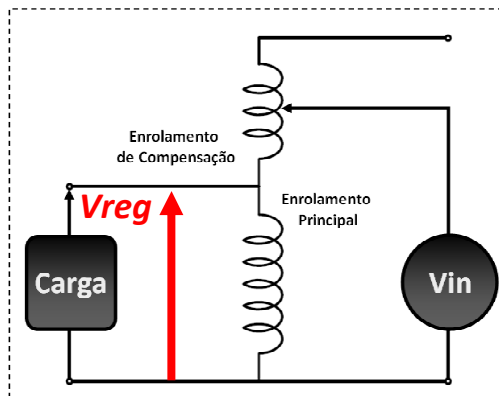


Figura 9 Regulador de Tensão do Tipo B.

Como é mostrado na Figura 10 existem dois tipos de enrolamentos do RECET: os de regulação (L_{reg1} e L_{reg2}) e o de excitação (L_{exc}). Sendo que os de regulação são constituídos por duas bobinas seccionadas entre si a L_{reg1} e a L_{reg2} , dessa forma é possível subtraí-las sem curto-circuitar o autotransformador. O enrolamento L_{reg1} está dividido em dois taps T_1 e T_2 , e o L_{reg2} está dividido em T_5 e T_{12} , onde os sub-índices indicam o número de vezes que será multiplicado o menor degrau de regulação em cada *tap*. Em quanto T_1 , T_2 , T_5 e T_{12} são *taps reais* [14], o total de combinações por eles

produzidas chega a um total de 41, nesse caso os *taps* decorrentes de combinações dos *taps reais* são denominados *taps virtuais* [14].

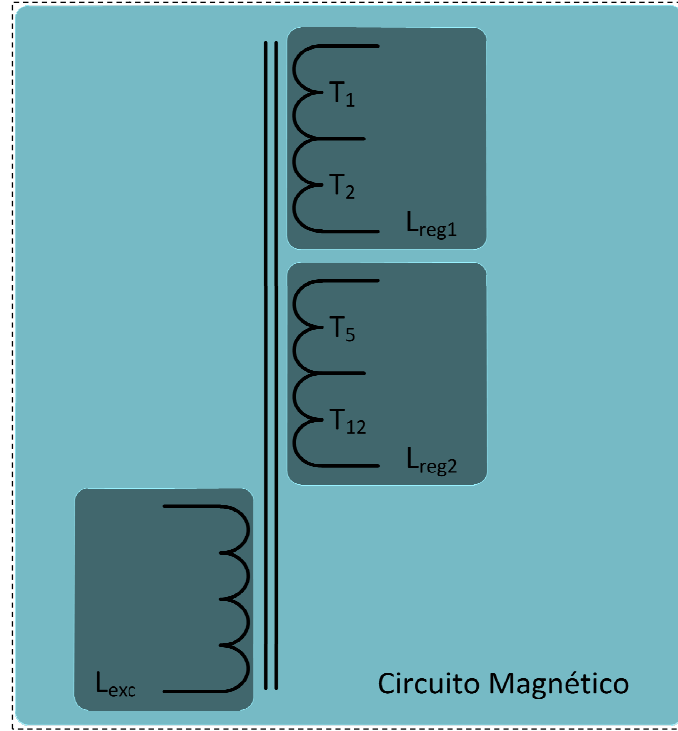


Figura 10 Circuito Magnético proposto para o RECET [14].

A estrutura matemática apresentada na Equação 4 representa a topologia do RECET no que tange as possíveis configurações de *taps*. Com esse modelo é possível prever o número de possibilidades de configurações do circuito magnético de regulação, enrolamentos L_{reg1} , L_{reg2} e seus respectivos *taps*. As variáveis S_1 e S_2 são binárias e representam a possibilidade de soma e subtração dos *taps*, por sua vez as variáveis a, b, c, d , também são binárias, porém representam as possibilidades combinatórias dos *taps* T_1, T_2, T_5, T_{12} [14].

$$Tap = S_1(aT_1 + bT_2) + S_2(cT_5 + dT_{12}) \quad \text{Equação 4 [14]}$$

Onde:

S_1 – sinal do *tap* 1 e 2;

S_2 – sinal do *tap* 5 e 12;

a, b, c, d – representa o sistema de seleção de *taps*;

T_1, T_2, T_5, T_{12} – representação relação de cada *tap* em relação à bobina de excitação.

As variáveis S_1 e S_2 estão relacionadas ao número de enrolamentos de regulação e as variáveis a, b, c, d relacionam-se ao número de *taps* reais [14].

A resolução da Equação 4 resulta em 41 *taps* diferentes, alguns dos quais se repetem em um universo de 64 possibilidades tal como pode ser visto na Tabela 3. Como a Equação 4 é discreta e dotada de variáveis binárias, uma tabela verdade pode ser utilizada obter as possíveis combinações de *taps*. Na tabela tem-se as colunas a, b, c, d, S_1 e S_2 as quais representam as possíveis combinações as quais tem como resultado os valores na coluna *tap* [14].

Tabela 3 Possibilidades ou tabela verdade das variáveis de entrada do RECET para o modelo matemático [14].

n	<i>tap</i>	a	b	c	d	$s1$	$s2$
1	0	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	1	-1
3	0	0	0	0	0	-1	1
4	0	0	0	0	0	-1	-1
5	12	0	0	0	1	1	1
6	-12	0	0	0	1	1	-1
7	12	0	0	0	1	-1	1
8	-12	0	0	0	1	-1	-1
9	5	0	0	1	0	1	1
10	-5	0	0	1	0	1	-1
11	5	0	0	1	0	-1	1
12	-5	0	0	1	0	-1	-1
13	17	0	0	1	1	1	1
14	-17	0	0	1	1	1	-1
15	17	0	0	1	1	-1	1
16	-17	0	0	1	1	-1	-1
17	2	0	1	0	0	1	1
18	2	0	1	0	0	1	-1
19	-2	0	1	0	0	-1	1
20	-2	0	1	0	0	-1	-1
21	14	0	1	0	1	1	1
22	-10	0	1	0	1	1	-1
23	10	0	1	0	1	-1	1
24	-14	0	1	0	1	-1	-1
25	7	0	1	1	0	1	1
26	-3	0	1	1	0	1	-1

27	3	0	1	1	0	-1	1
28	-7	0	1	1	0	-1	-1
29	19	0	1	1	1	1	1
30	-15	0	1	1	1	1	-1
31	15	0	1	1	1	-1	1
32	-19	0	1	1	1	-1	-1
33	1	1	0	0	0	1	1
34	1	1	0	0	0	1	-1
35	-1	1	0	0	0	-1	1
36	-1	1	0	0	0	-1	-1
37	13	1	0	0	1	1	1
38	-11	1	0	0	1	1	-1
39	11	1	0	0	1	-1	1
40	-13	1	0	0	1	-1	-1
41	6	1	0	1	0	1	1
42	-4	1	0	1	0	1	-1
43	4	1	0	1	0	-1	1
44	-6	1	0	1	0	-1	-1
45	18	1	0	1	1	1	1
46	-16	1	0	1	1	1	-1
47	16	1	0	1	1	-1	1
48	-18	1	0	1	1	-1	-1
49	3	1	1	0	0	1	1
50	3	1	1	0	0	1	-1
51	-3	1	1	0	0	-1	1
52	-3	1	1	0	0	-1	-1
53	15	1	1	0	1	1	1
54	-9	1	1	0	1	1	-1
55	9	1	1	0	1	-1	1
56	-15	1	1	0	1	-1	-1
57	8	1	1	1	0	1	1
58	-2	1	1	1	0	1	-1
59	2	1	1	1	0	-1	1
60	-8	1	1	1	0	-1	-1
61	20	1	1	1	1	1	1
62	-14	1	1	1	1	1	-1
63	14	1	1	1	1	-1	1
64	-20	1	1	1	1	-1	-1

A Tabela 3 serviu de base para modelar o comportamento do comutador eletrônico, o qual terá que dar caminho para os 41 degraus de tensão presentes nessa tabela. Uma representação gráfica da Tabela 3 pode ser encontrada na Figura 11, nela pode-se verificar que a distribuição da repetição de *taps* segue uma distribuição regular e simétrica, conforme pode ser verificado em [14].

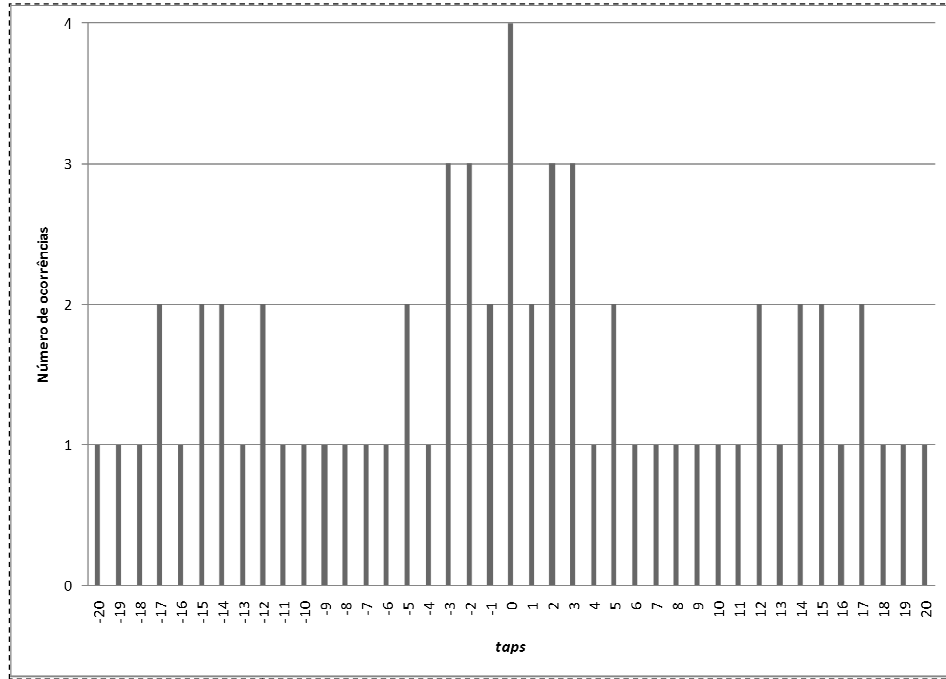


Figura 11 Representação do número de *taps* conforme a ocorrência para o modelo matemático [14].

Dando continuidade ao estudo das equações de modelagem, temos:

$$V_{tap} = TapV_i \quad \text{Equação 5 [14]}$$

$$V_{tap} = TapV_{reg} \quad \text{Equação 6 [14]}$$

Substituindo Equação 4 nas Equação 5 e Equação 6, obtém-se:

$$V_{tap} = V_i[S_1(aT_1 + bT_2) + S_2(cT_5 + dT_{12})] \quad \text{Equação 7 [14]}$$

$$V_{tap} = V_{reg}[S_1(aT_1 + bT_2) + S_2(cT_5 + dT_{12})] \quad \text{Equação 8 [14]}$$

Sendo a Equação 7 para reguladores do Tipo A e a Equação 8 para reguladores do Tipo B. A Equação 9 modela o comportamento do RECET quando a bobina de excitação está sendo alimentada pela tensão V_i , tensão não regulada, essa equação descreve o comportamento dos reguladores do tipo A, Figura 8 [14].

$$V_{reg} = V_i[S_1(aT_1 + bT_2) + S_2(cT_5 + dT_{12}) + 1] \quad \text{Equação 9 [14]}$$

Onde,

V_{reg} – tensão regulada;

V_i – tensão não regulada;

S_1 – sinal do *tap* 1 e 2;

S_2 – sinal do *tap* 5 e 12;

a, b, c, d – representa o sistema de seleção de *tap*;

T_1, T_2, T_5, T_{12} – representação relação de cada *tap* em relação à bobina de excitação.

Como pode ser verificado Equação 9 a tensão dos taps T_1, T_2, T_5, T_{12} , varia em função da tensão não regulada V_i . Isso implica que a curva de compensação é afetada pela tensão não regulada, o que pode comprometer a eficiência do regulador de tensão. Por sua vez, a Equação 10 representa o RECET quando esse tem sua bobina de excitação sendo alimentada pela tensão regulada. Isso implica em uma realimentação na topologia do circuito [14]. Dessa forma a tensão regulada tem influência na decisão do controle, podendo levá-lo à instabilidade.

$$V_{reg} = V_{reg}[S_1(aT_1 + bT_2) + S_2(cT_5 + dT_{12})] + V_i \quad \text{Equação 10 [14]}$$

Finalmente, com essa modelagem matemática, prosseguiu-se com a implementação de um modelo digital, a fim de validar esse conjunto de equações. No tópico seguinte será apresentado o modelo digital para o regulador tipo A, objeto deste trabalho.

4.2 Implementação do Modelo Matemático

A implementação do modelo digital para o controle do RECET foi feita tendo como base o estudo dos capítulos 2, 3 e análise da modelagem apresentada no capítulo 4 para o regulador tipo A. De acordo com a análise proposta anteriormente, pode-se estruturar o controle em blocos bem definidos, como segue:

- *Bloco I*: Detector de Fase e Amplitude (DFA);
- *Bloco II*: Comparação (COM);
- *Bloco III*: Sistema de Seleção de *TAPS* (SST);
- *Bloco IV*: Lógica de Compensação Direta (LCD);
- *Bloco V*: Regulação (REG).

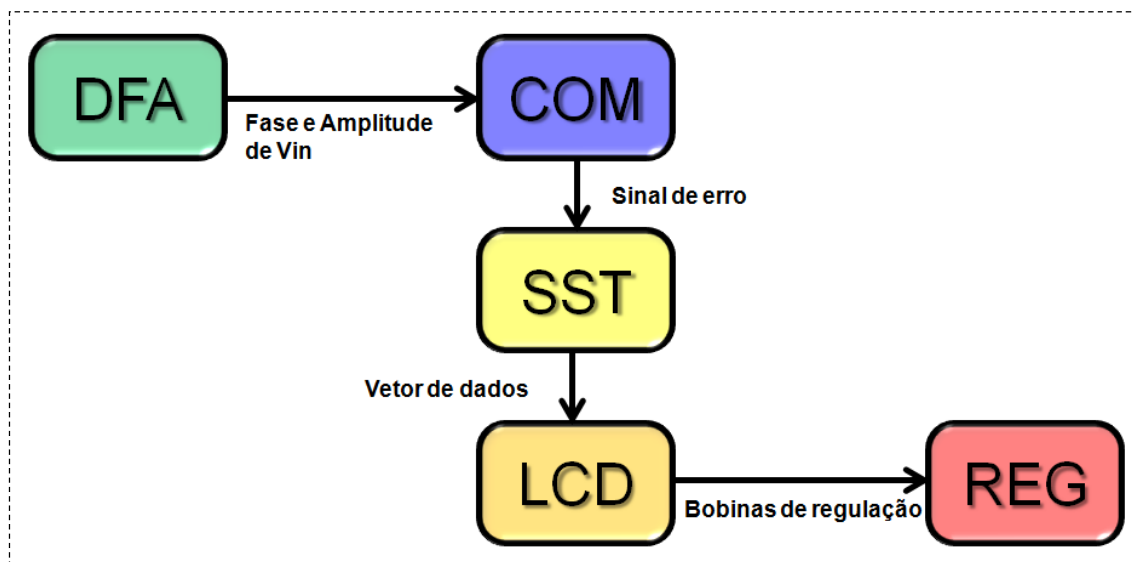


Figura 12 Blocos para validação do modelo matemático do S-DVR20.

Em uma visão geral do diagrama de blocos de controle, o Bloco I ou Detector de Fase e Amplitude é aquele que recebe a medição de tensão da bobina de excitação (bobina principal) como sinal de entrada do controlador do RECET. O Detector de Fase e Amplitude é um circuito capaz de detectar a fase e a amplitude do sinal de entrada do regulador. Detalhes sobre esse circuito serão apresentados no Anexo: descrição simplificada de um circuito *E-PLL* [7].

O sinal resultante do Bloco I é passado para o sistema por unidade – p.u., para então poder ser comparado com o sinal de referência de 1,0 p.u. O bloco de comparação – COM, gera um sinal de erro, que corresponde à tensão a ser compensada pelo S-DVR20.

O sinal de erro é entregue ao Bloco III ou de Sistema de Seleção de *TAPS*. Nesse bloco o sinal de erro é processado pelo sistema de controle automático e a tensão de compensação é associada a um dos 41 estágios de compensação do regulador. Se o erro for maior que o estipulado para as tensões de compensação do regulador, o regulador passa automaticamente para o *tap* máximo ou mínimo, dependendo do sentido que foi extrapolado.

O bloco Lógica de Compensação Direta, ou Bloco IV, tem a finalidade de efetivamente associar os parâmetros a, b, c, d, s1 e s2 do Bloco III ao modelo matemático do autotransformador, produzindo um valor real que representa a bobina de compensação de um autotransformador real. Esse valor resultante será utilizado para produzir a tensão regulada no Bloco V, ou de regulação.

De acordo com a estrutura apresentada, a tensão regulada deve estar, portanto muito próxima de 1,0 p.u, demonstrando que o controle foi capaz de regular a tensão de entrada.

Cada uma das partes do controle apresentada no diagrama de blocos da Figura 12, será melhor detalhada nos itens seguintes.

4.2.1 Bloco I: Detector de Fase e Amplitude - DFA

O detector de fase e amplitude é um circuito de sincronismo, como dito no item anterior, capaz de rastrear o módulo e a frequência da fundamental de sequencia positiva do sinal de entrada. Como pode ser verificado em [7], a proposição de um circuito PLL para detecção de fase e amplitude pode ser melhorada para além dos parâmetros mencionados ser utilizado para instantaneamente obter a magnitude do sinal de entrada. Dessa forma o circuito da Figura 13 foi utilizado para obter V_i .

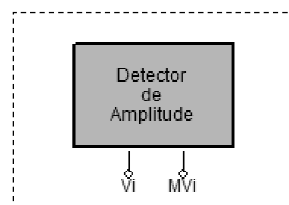


Figura 13 Bloco do circuito PLL ou Detector de fase e amplitude.

O circuito utilizado para detecção foi uma evolução do PLL, conhecido como Enhanced-PLL ou simplesmente E-PLL [9] [7] [6] [5].

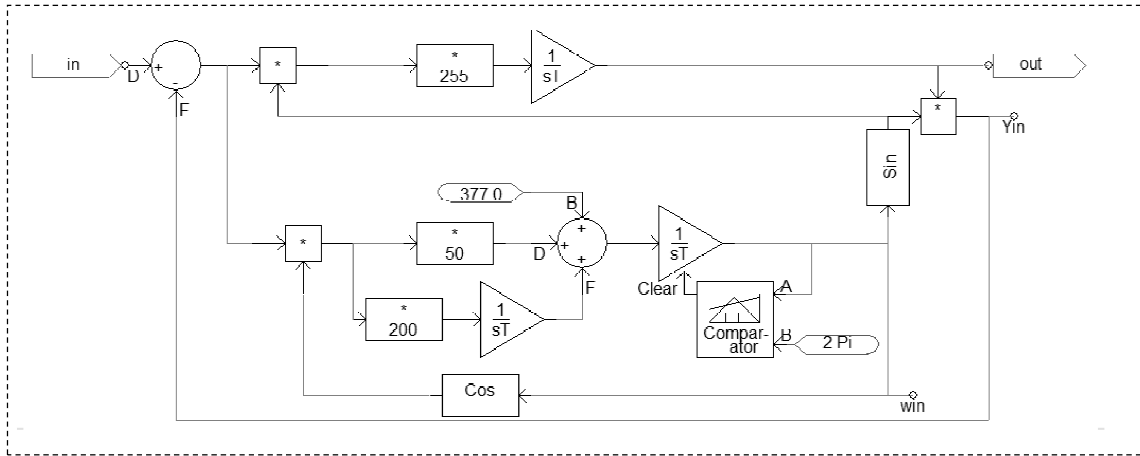


Figura 14 Circuito EPLL adotado para o modelo.

De acordo com [7], [9] e [17] os ganhos para este tipo de circuito devem ser configurados para valores próximos ao da figura anterior, a fim de garantir seu melhor desempenho. Devido à não-linearidade deste circuito, sua descrição analítica detalhada torna-se bastante complexa para os fins deste trabalho. Contudo, informações básicas deste circuito podem ser encontradas no anexo deste trabalho.

4.2.2 Bloco II: Comparação - COM

O bloco de comparação serve unicamente para gerar o sinal de erro, comparando a magnitude do sinal do bloco DFA com a referência de 1,0 p.u. O bloco pode ser visualizado pela Figura 15, a seguir.

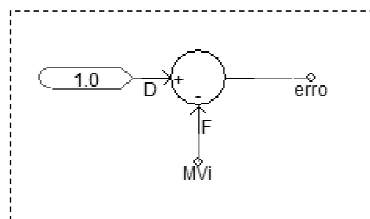


Figura 15 Bloco de comparação: erro resulta na tensão V_{tap} .

Como pode ser observado pela figura anterior, o sinal de erro pode ser zero, um valor positivo ou um valor negativo. Para que o erro seja zero, a magnitude da tensão de entrada deve ser exatamente igual a 1,0 p.u, situação que aciona o tap 0 (zero). Vale reforçar que este controle se aplica ao regulador tipo A.

Caso o erro seja maior que zero, isso significa que a tensão de entrada é menor que 1,0 p.u, ou seja, a tensão de entrada está abaixo de 7,967 kV. Nesse caso o sistema de seleção de *taps* acionará um dos *taps* positivos e elevando, portanto, o nível de tensão de saída. Já no caso do erro ser menor que zero, a tensão de entrada é maior que 1,0 p.u, ou seja, a tensão de entrada está acima de 7.967V. Nesse caso o sistema de seleção de *taps* acionará um dos *taps* negativos e reduzindo, portanto, o nível de tensão de saída.

4.2.3 Bloco III: Sistema de Seleção de TAPS - SST

Nessa parte do controle o sinal de erro é conduzido a todos os 41 estágios de compensação e somente um desses estágios será acionado.

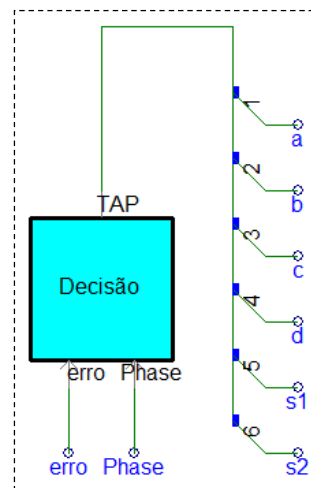


Figura 16 Bloco de Seleção ou Decisão de *TAPS*.

A escolha é feita a partir da faixa de operação dos taps, como é sugerido na tabela a seguir, também chamada de *Look Up Table* (LUT) [2].

Tabela 4 Faixa de tensão dos *taps*.

TAP	Limite Inf.	Limite Sup.	V_i (p.u.)		TAP	Limite Inf.	Limite Sup.	V_i (p.u.)	
“-21”	0,128125	0,134375	0,865625	0,871875	0	-0,003125	0,003125	0,996875	1,003125
-20	0,121875	0,128125	0,871875	0,878125	1	-0,009375	-0,003125	1,003125	1,009375
-19	0,115625	0,121875	0,878125	0,884375	2	-0,015625	-0,009375	1,009375	1,015625
-18	0,109375	0,115625	0,884375	0,890625	3	-0,021875	-0,015625	1,015625	1,021875
-17	0,103125	0,109375	0,890625	0,896875	4	-0,028125	-0,021875	1,021875	1,028125
-16	0,096875	0,103125	0,896875	0,903125	5	-0,034375	-0,028125	1,028125	1,034375
-15	0,090625	0,096875	0,903125	0,909375	6	-0,040625	-0,034375	1,034375	1,040625
-14	0,084375	0,090625	0,909375	0,915625	7	-0,046875	-0,040625	1,040625	1,046875
-13	0,078125	0,084375	0,915625	0,921875	8	-0,053125	-0,046875	1,046875	1,053125
-12	0,071875	0,078125	0,921875	0,928125	9	-0,059375	-0,053125	1,053125	1,059375
-11	0,065625	0,071875	0,928125	0,934375	10	-0,065625	-0,059375	1,059375	1,065625
-10	0,059375	0,065625	0,934375	0,940625	11	-0,071875	-0,065625	1,065625	1,071875
-9	0,053125	0,059375	0,940625	0,946875	12	-0,078125	-0,071875	1,071875	1,078125
-8	0,046875	0,053125	0,946875	0,953125	13	-0,084375	-0,078125	1,078125	1,084375
-7	0,040625	0,046875	0,953125	0,959375	14	-0,090625	-0,084375	1,084375	1,090625
-6	0,034375	0,040625	0,959375	0,965625	15	-0,096875	-0,090625	1,090625	1,096875
-5	0,028125	0,034375	0,965625	0,971875	16	-0,103125	-0,096875	1,096875	1,103125
-4	0,021875	0,028125	0,971875	0,978125	17	-0,109375	-0,103125	1,103125	1,109375
-3	0,015625	0,021875	0,978125	0,984375	18	-0,115625	-0,109375	1,109375	1,115625
-2	0,009375	0,015625	0,984375	0,990625	19	-0,121875	-0,115625	1,115625	1,121875
-1	0,003125	0,009375	0,990625	0,996875	20	-0,128125	-0,121875	1,121875	1,128125
0	-0,003125	0,003125	0,996875	1,003125	“21”	-0,134375	-0,128125	1,128125	1,134375

Para a formação dos números da tabela 4, utilizou-se como referência a faixa de tensão em p.u. do tap 0 (zero). Sabe-se que o degrau mínimo do regulador deve ser de 0,00625 p.u de tensão e dessa forma esse degrau foi inserido em uma faixa de menos 0,003125 p.u a mais 0,003125 p.u de maneira que dentro desta faixa seria acionado o tap 0 (zero). O degrau negativo seguinte, correspondente ao tap -1 estaria em uma faixa de tensão entre 0,003125 a 0,009375 e assim sucessivamente. A mesma lógica se aplica para os degraus positivos. Os *taps* “-21” e “21” foram criados apenas para verificação de limites do regulador.

A coluna V_i indica a faixa de tensão de entrada do dispositivo que fará com que seja acionado o tap relativo (na mesma linha da tabela). Dessa forma, para o caso do tap 0 (zero) ser acionado a tensão de entrada deve estar entre 0,996875 p.u. a 1,003125 p.u. Os *taps* “-21” e “21” foram inseridos no modelo apenas para verificação de testes do controlador para níveis de tensão fora da faixa de operação do RECET.

Os estágios do sistema totalizam 41 vetores de dimensão 6, em que somente um deles será associado à variável de saída, preparada para receber um vetor de dimensão 6, de acordo com o pulso de controle TP. Uma dificuldade encontrada foi que não há no PSCAD um bloco que faça essa operação automaticamente e, portanto, essa operação teve que ser criada.

A solução do problema surgiu com a possibilidade de adicionar um *script* de comando em linguagem Fortran para implementação do controle automático. Sabe-se que o PSCAD trabalha com compiladores *Fortran77* e *Fortran90*, sendo necessário adicionar o script ao módulo de trabalho em Fortran ou chamar uma subrotina de programação em linguagem C para um arquivo.C anexado ao programa. Optou-se por criar o script ou Fortran por simplicidade.

Basicamente foi feito um sistema de seleção automática de *taps*, utilizando o condicional IF. Um bloco genérico da seleção de taps é apresentado a seguir.

```
IF (TSYY.EQ.1) THEN  
    DO NUM IT_0 = 1,6  
        TAP(IT_0) = TAPSY(Y IT_0)  
        NUM CONTINUE  
END IF
```

Para o script não foi necessário declarar variáveis do sistema, pois as variáveis foram declaradas automaticamente pelo PSCAD. Quando o pulso de controle TP, genericamente representado por TSYY, for igual a 1 o vetor TAP(IT_0) recebe o vetor de dimensão 6 TAPSY(Y IT_0), onde TAPSY(Y IT_0) é o vetor TAP(S)(YY) mencionado anteriormente no texto.

Um detalhe importante a ser mostrado é o sequencial NUM, pertencente ao comando DO. Ao analisar o arquivo em Fortran gerado automaticamente pelo PSCAD, notou-se que o DO é gerado sequencialmente, de acordo com o algoritmo interno do programa. Assim, verificou-se que o último DO utilizado na programação foi o DO 103 e, dessa forma, qualquer condicional com atribuição de vetores deveria ser incrementado a partir desse valor. O script completo não será apresentado por não diferir estruturalmente das linhas de comando adicionadas acima.

Dessa forma, pelo script criado, a variável TAP(6) recebe TAPSY(6) quando o pulso de controle TSY for igual a 1. Qualquer valor para o pulso de controle que não seja 1 o condicional é encerrado. Assim, tem-se 1 e somente 1 vetor de dados real associado à saída e portanto associado ao Bloco LCD.

4.2.4 Bloco IV: Lógica de Compensação Direta - LCD

Como foi mostrado na análise topológica do RECET, o regulador pode ser implementado matematicamente. Uma vantagem dessa abordagem, como já dito anteriormente, é a simplificação do seu modelo eliminando-se o circuito magnético e o comutador eletrônico, facilitando a implementação do controle, como será mostrado agora.

Segundo a Equação 9, T_1, T_2, T_5, T_{12} representam a relação de cada bobina do autotransformador em relação à bobina de excitação, enquanto que a, b, c, d são os sinais de controle ou as variáveis de seleção de *taps*.

As variáveis de seleção já foram armazenadas em vetores, como foi mostrado no Bloco SST. O sistema já é capaz de atuar automaticamente a partir do pulso de controle. Logo, se fez necessário utilizar as relações de cada bobina T_1, T_2, T_5, T_{12} para efetivamente selecionar um tap de acordo com a Equação 9.

De acordo com a topologia do RECET, as relações de cada bobina em relação à bobina de excitação são as seguintes:

$$T_1 = 0,625\%;$$

$$T_2 = 1,250\%;$$

$$T_5 = 3,125\%;$$

$$T_{12} = 7,500\%.$$

Tendo em vista essas relações, basta adicionar o sinal de cada enrolamento T_1+T_2 ou T_5+T_{12} para obter o Bloco LCD, na figura a seguir.

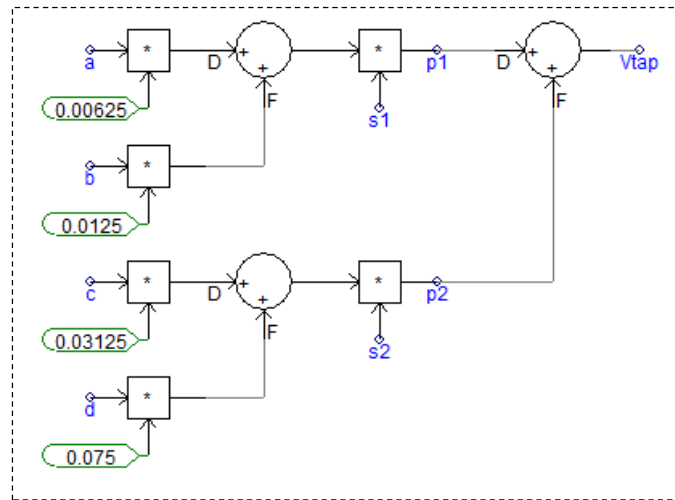


Figura 18 Modelo analítico do autotransformador do RECET.

As entradas do Bloco LCD são, portanto, o vetor de dados armazenado na variável exportada do Bloco SST. Pela Figura 18, V_{tap} é a tensão de compensação em valor por unidade.

4.3 Validação do Modelo Matemático

Após estudar a topologia e a sua modelagem, conforme descrito no item anterior, a etapa seguinte é a validação deste modelo matemático, ou seja, verificar que os resultados das simulações do modelo matemático traduzem o comportamento esperado para regulação de tensão.

O primeiro teste consiste em verificar a capacidade de compensação de tensão para uma variação de amplitude máxima, no caso de sobre-tensão. Para esta simulação foi adotado o passo de 10 us, com tempo total de 400 ms e plotagem de dados de 50 us por canal.

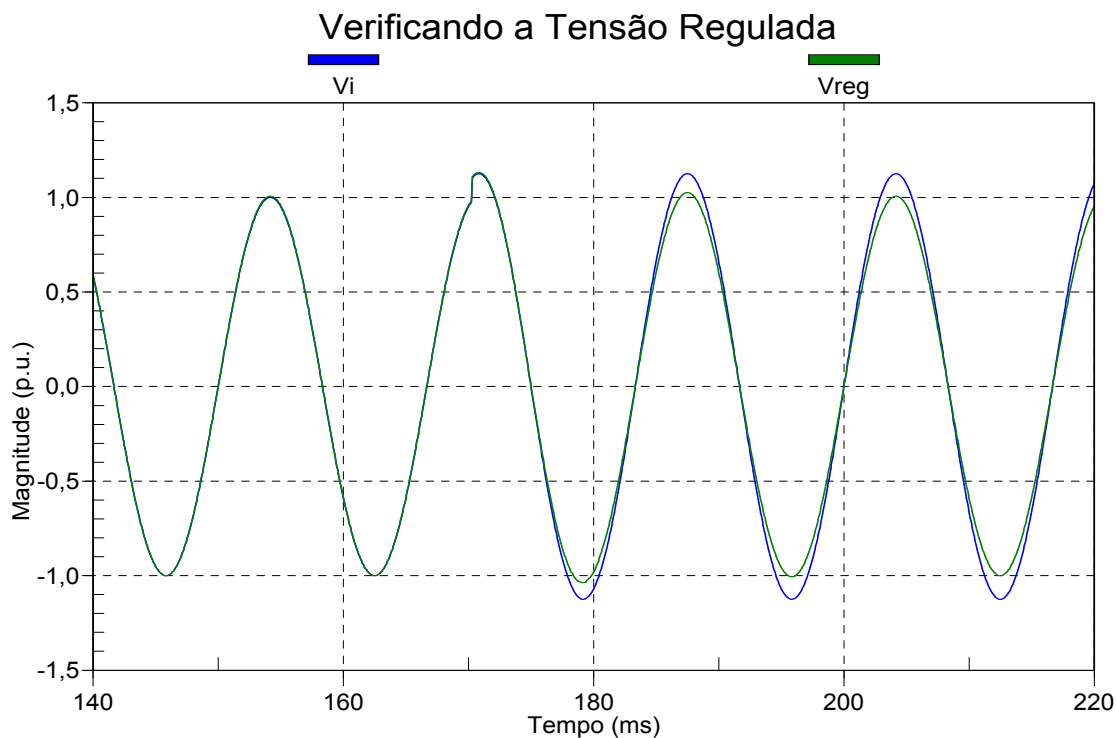


Figura 19 Gráfico da tensão de compensação para sobre-tensão máxima suportável.

Observa-se pela figura anterior que o modelo foi capaz de compensar uma variação máxima de amplitude de 12,5%, sendo a tensão regulada V_{reg} mantida em 1,0 p.u. Em aproximadamente 170 ms foi aplicado um degrau de tensão na entrada do regulador (matemático), sendo a tensão regulada estabilizada em 1,0 p.u. em aproximadamente meio ciclo de onda, como era esperado.

A fim de validar o modelo matemático inteiramente e, por conseguinte, as equações do capítulo 3, foi feita uma rotina em Fortran para variar a tensão de entrada a fim de comutar automaticamente todos os taps positivos e negativos do regulador de uma só vez. Assim além de validar as equações de controle foi possível ainda confirmar a robustez do sistema de controle proposto. Primeiramente, será mostrado como foi possível controlar a tensão de entrada para obter 20 níveis de tensão distintos. Em seguida a tensão de entrada será regulada automaticamente pelo controle, mantendo a tensão regulada no seu valor nominal.

Foi criado um módulo no PSCAD chamado Varp, que consistiu de um script para modelagem de uma fonte de tensão. Os valores dessa fonte podem ser escolhidos selecionando os valores reais desejados, tendo como base o sistema por unidade. O script pode ser verificado como segue.

```
! TAP 0 / Condição Inicial  
IF (TIME.EQ.0.000) THEN  
    Varp = V00  
END IF
```

```
! TAP 1  
IF (TIME.EQ.0.0200) THEN  
    Varp = V01  
END IF
```

•
•
•

```
! TAP 20  
IF (TIME.EQ.0.3367) THEN  
    Varp = V20  
END IF
```

O valor de Varp será parâmetro de entrada de uma fonte de tensão alternada, 60 Hz, do PSCAD. O valor de entrada da fonte será tal que $0,875 \leq Varp \leq 1.125$. Em valores nominais, a tensão de entrada varia de 6.971,125 a 8.962,875 V.

Uma vez modelada a fonte de tensão, o segundo teste consistiu em variar a tensão de entrada de 1,0 p.u até o valor mínimo suportável de entrada. Os resultados são mostrados como a seguir.

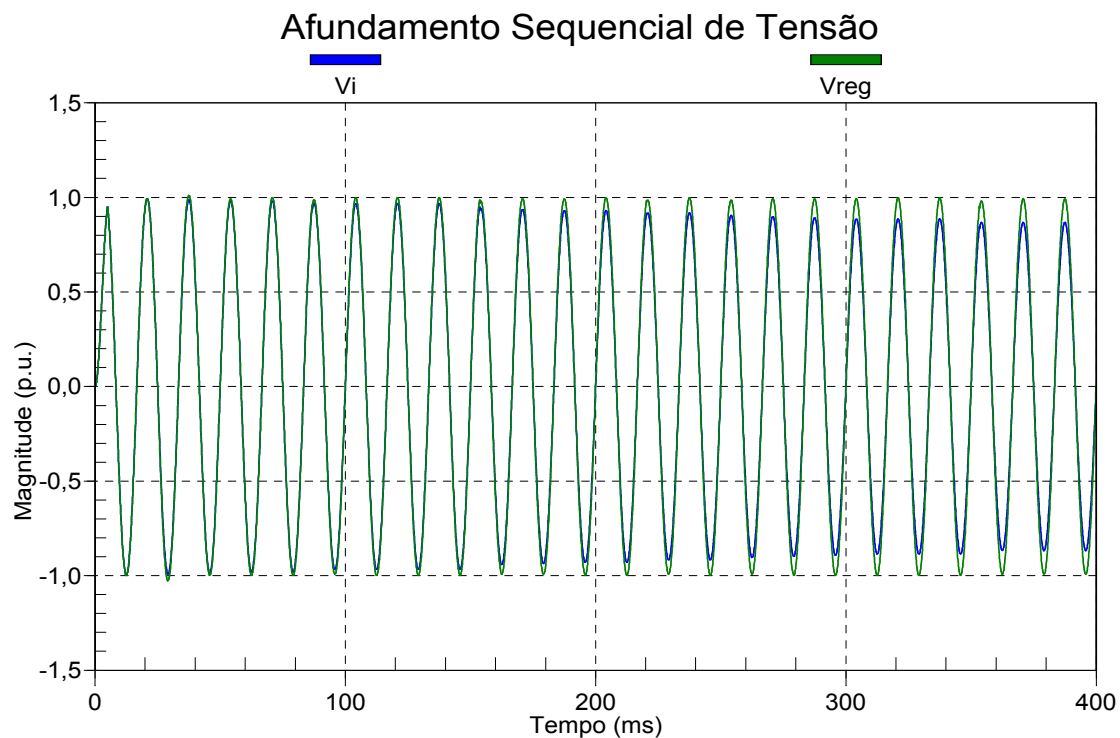


Figura 20 Tensões V_i e V_{reg} para afundamento gradativo de tensão V_i : todos os taps positivos acionados.

Como se observa pela figura acima, A tensão de entrada variou de 1,0 p.u até o valor mínimo 0,875 p.u, correspondente a curva em azul. A curva em verde, tensão regulada, manteve-se em 1,0 p.u para todos os valores de tensão de entrada na faixa de compensação prevista para o regulador.

O condicional de tempo recebe um incremento de 16,67 ms, enquanto a tensão V_{arp} é decrementada de 0,00625 p.u. Assim, a cada ciclo completo a tensão de entrada é reduzida para que o controle acione um dos *taps*, sendo os *taps* acionados sucessivamente.

Um gráfico interessante é quando se pode comparar a tensão de compensação com a tensão de entrada, observando-se a relação de fase entre elas. Esse gráfico pode ser observado a seguir.

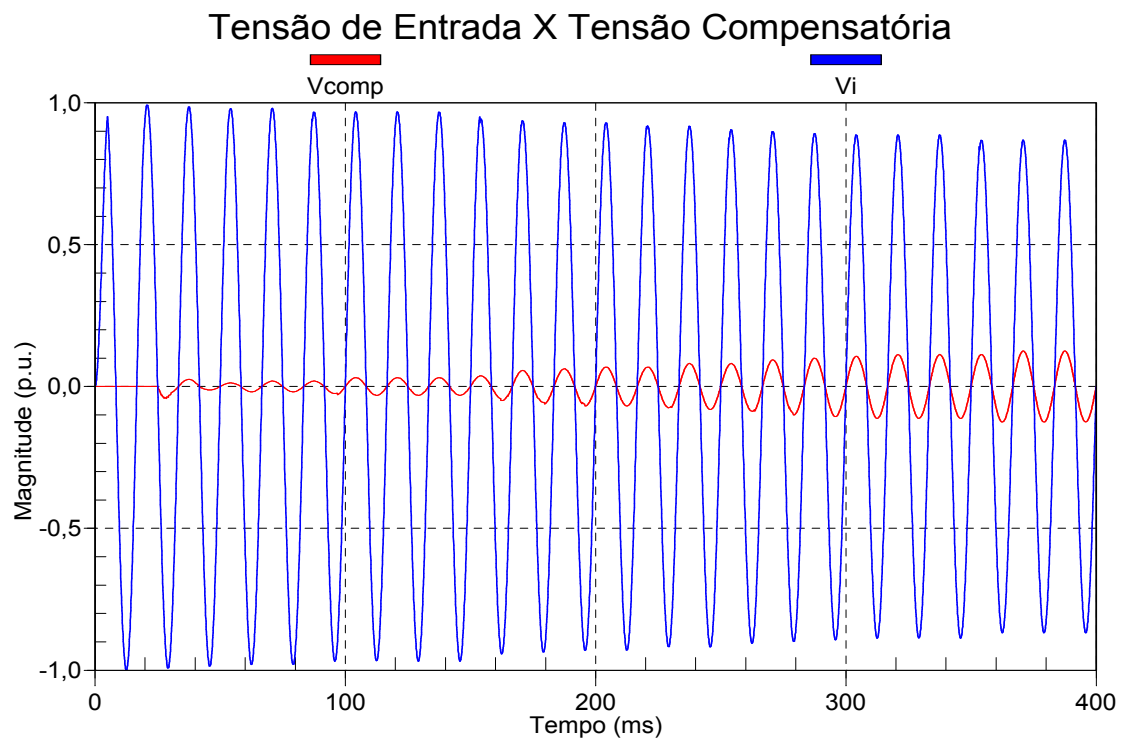


Figura 21 Tensões V_i e V_{comp} (V_{tap}) para afundamento gradativo de tensão V_i .

A tensão V_{tap} , de compensação, pode ser observada no gráfico a seguir.

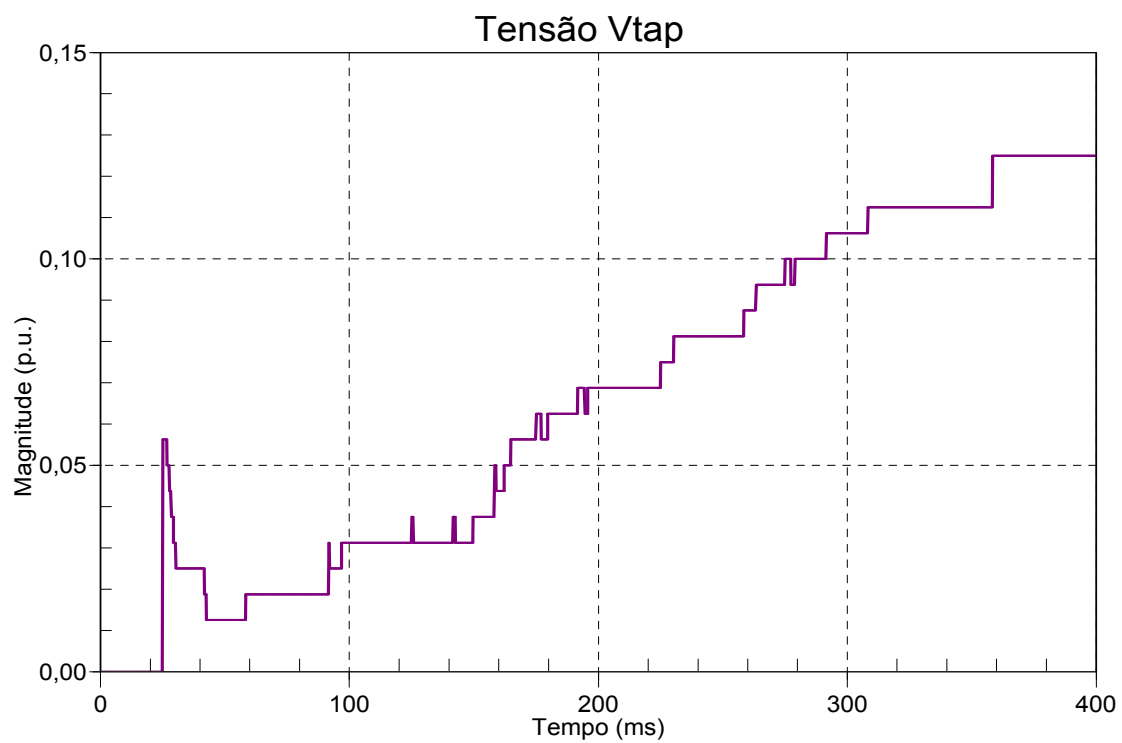


Figura 22 Tensão de compensação V_{tap} : *taps* positivos.

É possível ainda observar o pulso de controle TSY, confirmando a atuação do comutador eletrônico em todos os instantes da simulação, como pode ser verificado na Figura 23.

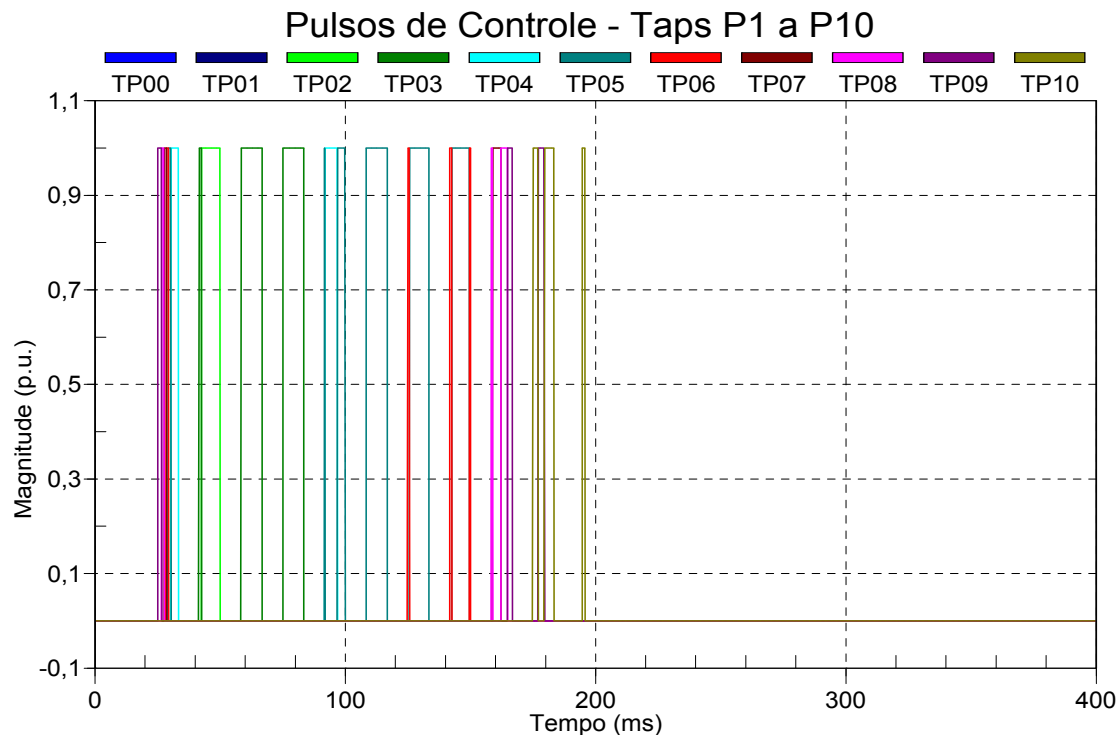


Figura 23 Pulsos de controle TSY para TP01 a TP10.

De acordo com a figura anterior, fica evidenciada a sequência de pulsos de acionamento dos *taps*, sendo o intervalo de tempo de 200 ms a 400 ms o acionamento dos taps TP11 a TP20. Esses pulsos foram omitidos do gráfico para redução da paleta de cores, por simplicidade. Como pode ser constatado também pelo mesmo gráfico, não há superposição dos pulsos de controle dos taps, de maneira que apenas um vetor de dados é recebido pelo Bloco LCD.

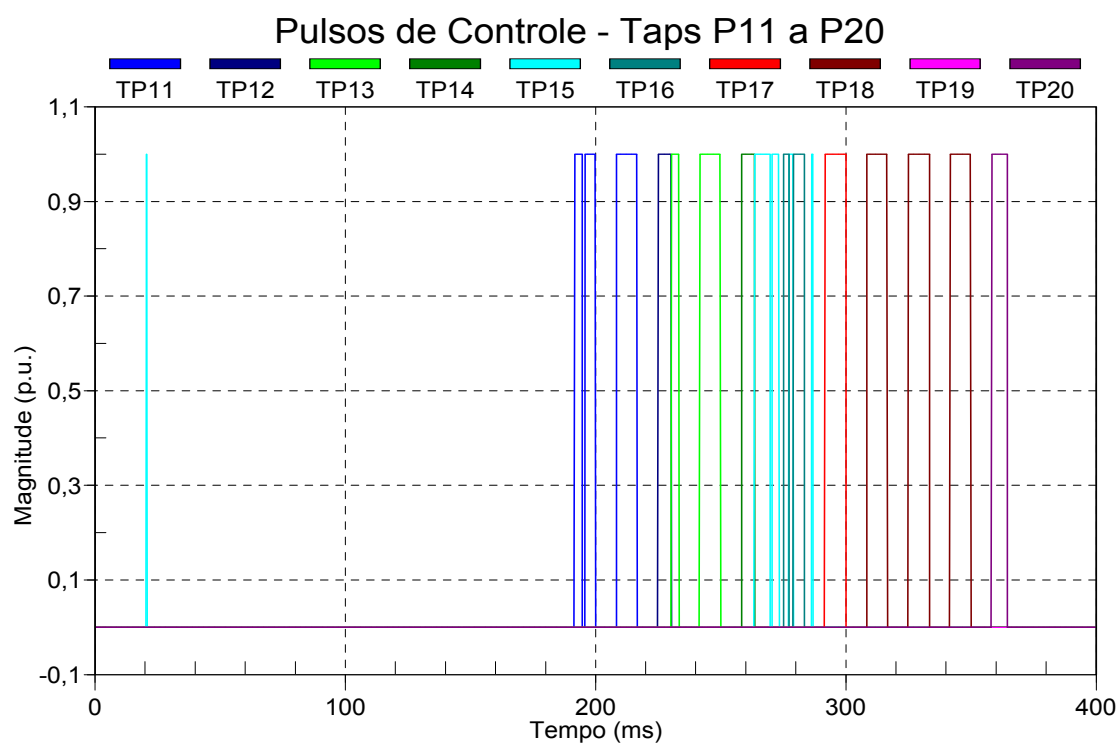


Figura 24 Pulsos de controle TSYT para TP11 a TP20.

Complementando a Figura 23, o gráfico anterior apresenta os pulsos de controle dos *taps* P11 a P20, sendo omitido os pulsos do intervalo de tempo de 0 ms a 200 ms.

O segundo teste foi variar a tensão de entrada de 1,0 p.u até o valor máximo de compensação. Os resultados são mostrados como segue.

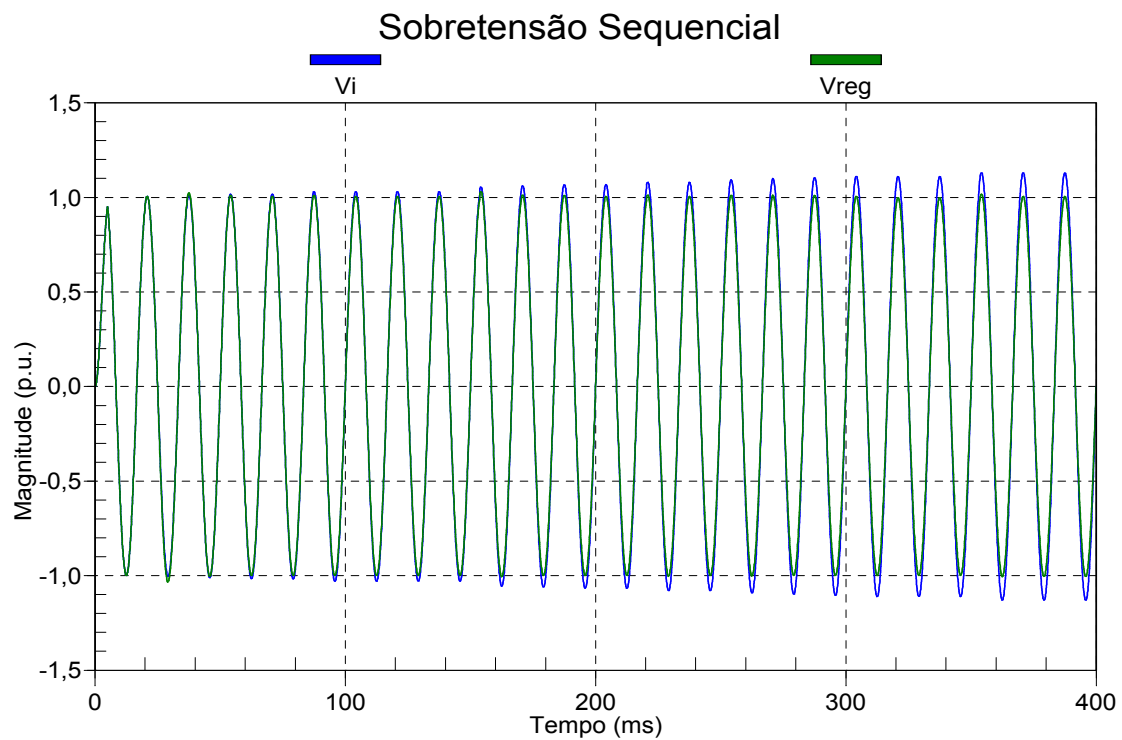


Figura 25 Tensões V_i e V_{reg} para sobre-tensão gradativa de V_i : todos os taps negativos acionados.

Como se observa pela Figura 25, A tensão de entrada variou de 1,0 p.u até o valor máximo 1,125 p.u, correspondente a curva em azul. A curva em verde, tensão regulada, manteve-se em 1,0 p.u para todos os valores de tensão de entrada na faixa de compensação prevista para o regulador.

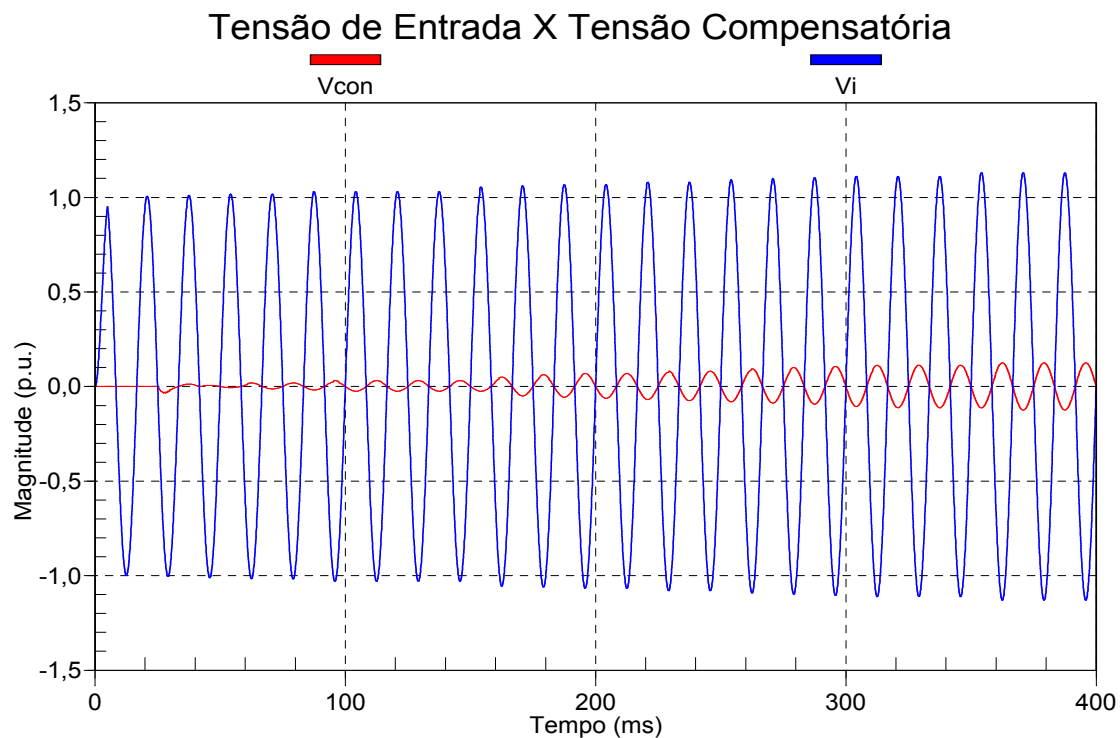


Figura 26 Tensões V_i e V_{con} (V_{tap}) para sobre-tensão gradativa de V_i .

Deve-se observar neste ponto que, de acordo com as tensões da Figura 26 anterior, os sinais de V_i e V_{tap} estão defasados de 180° , caso inverso ao gráfico similar para afundamento sequencial de tensão (Figura 21). Esta característica de defasagem que permite a compensação da tensão no regulador tipo S-DVR. É possível verificar que a subtração dos sinais da figura resulta em um nível de tensão muito próximo de 1,0 p.u., objetivo principal do regulador.

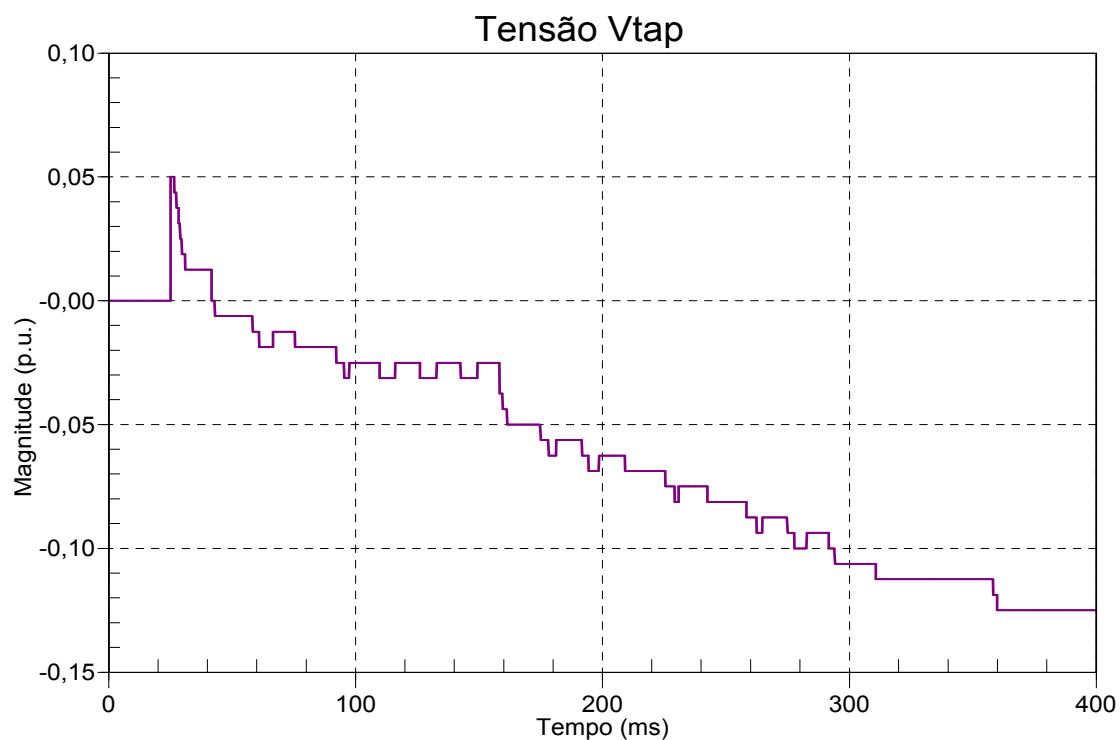


Figura 27 Tensão de compensação Vtap: *taps* negativos.

A tensão Vtap da Figura 27, varia em módulo até o limite de compensação de 0,125 ou 12,5% em aproximadamente 360 ms, sendo todos os níveis de compensação contemplados pela validação.

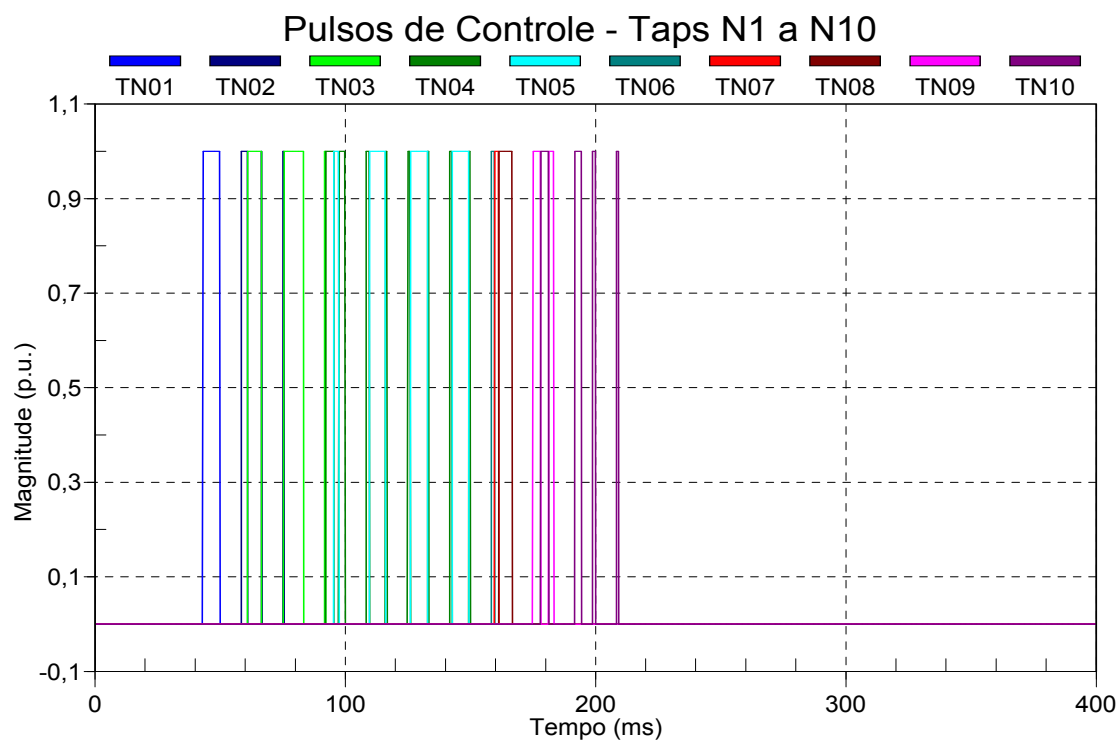


Figura 28 Pulsos de controle TSYT para TN01 a TN10.

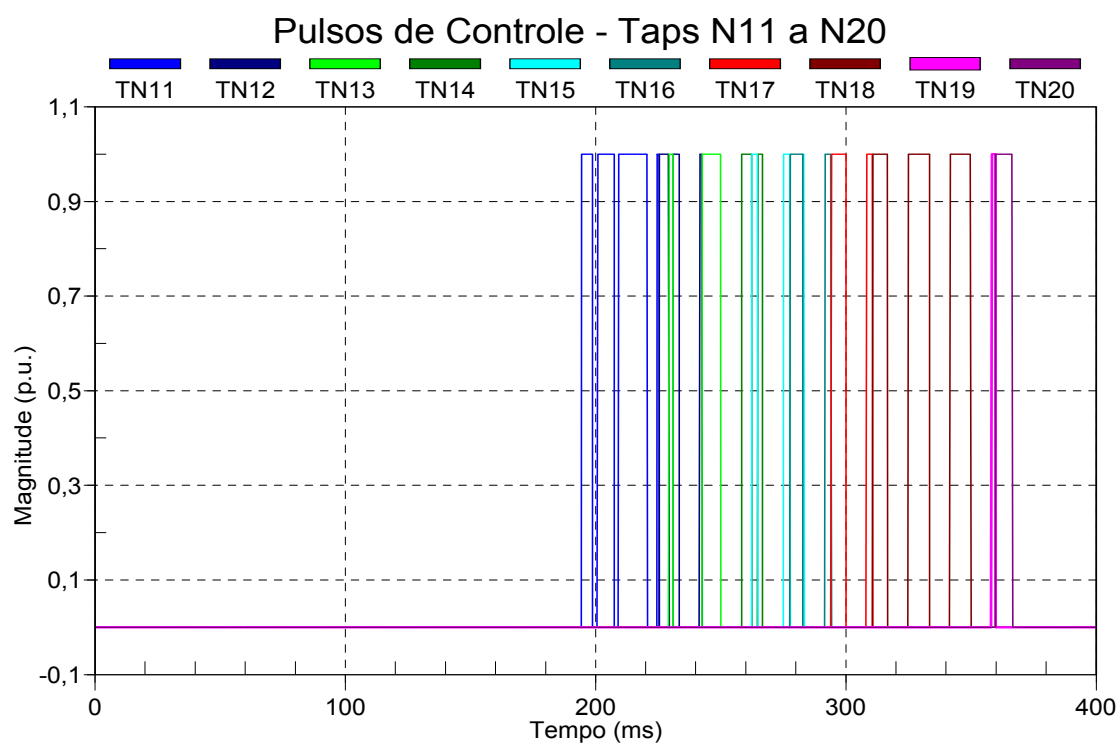


Figura 29 Pulsos de controle TSYT para TN11 a TN20.

Outro gráfico importante de validação é o demonstrado pela detecção da amplitude na saída do circuito PLL [5], como pode ser verificado a seguir:

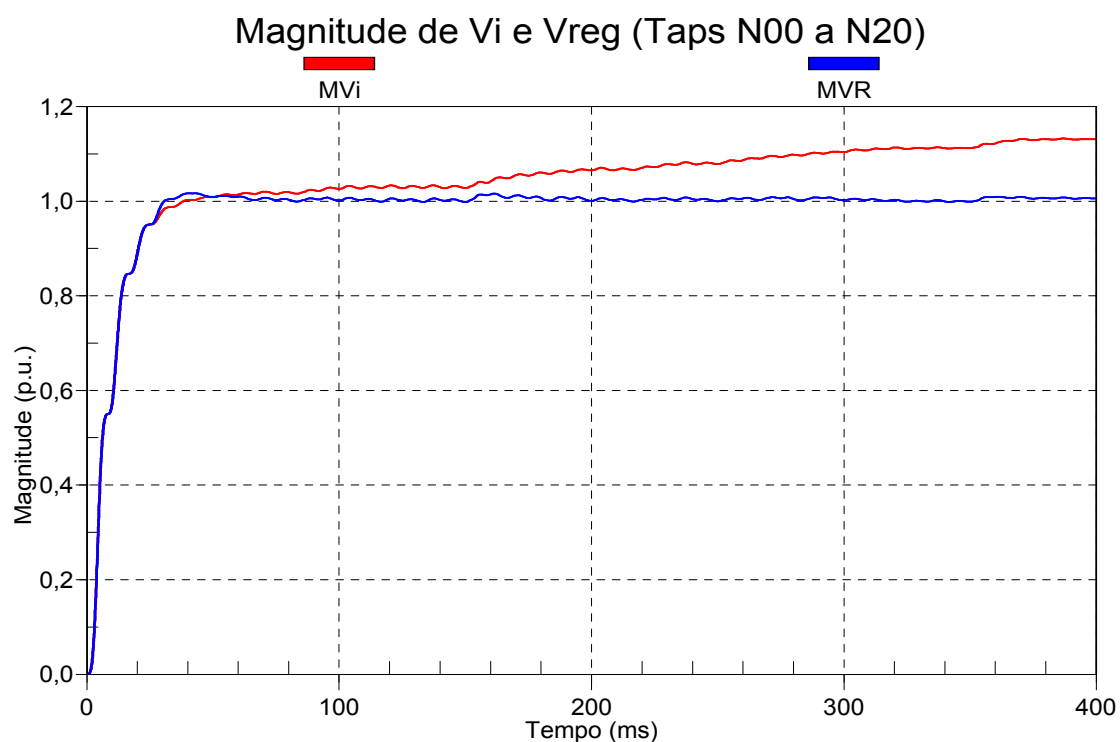


Figura 30 Magnitude de tensão na saída do PLL: sobretensão (MVi) e tensão regulada (MVR) Tap Negativo

O sincronismo dos pulsos das Figuras 23-24 e 28-29 é feito com base no rastreamento da fase do sinal de entrada do circuito de sincronismo. Basicamente a fase do sinal de entrada é extraído e o controle dispara os pulsos em sincronismo. Este disparo é realizado sempre que a tensão passa por zero, reproduzindo matematicamente uma situação em que o circuito do autotransformador é acionado com uma carga de fator de potência unitário, ou seja, a tensão em fase com a corrente. Como a validação faz uso de um modelo puramente matemático, a preocupação do sincronismo de corrente foi omitida e será retomada no próximo capítulo, implementação do controle automático em um modelo real S-DVR20.

Para concluir este capítulo, será apresentado mais um gráfico que traduz outra característica importante do controle: o valor do erro gerado é simétrico ao valor da magnitude de tensão de entrada. Dessa forma, o erro gerado é sempre um espelho do valor de magnitude de entrada.

Neste caso o sinal de erro pode ser visto como um número de correção, ou seja, o erro é utilizado como parâmetro de compensação do regulador.

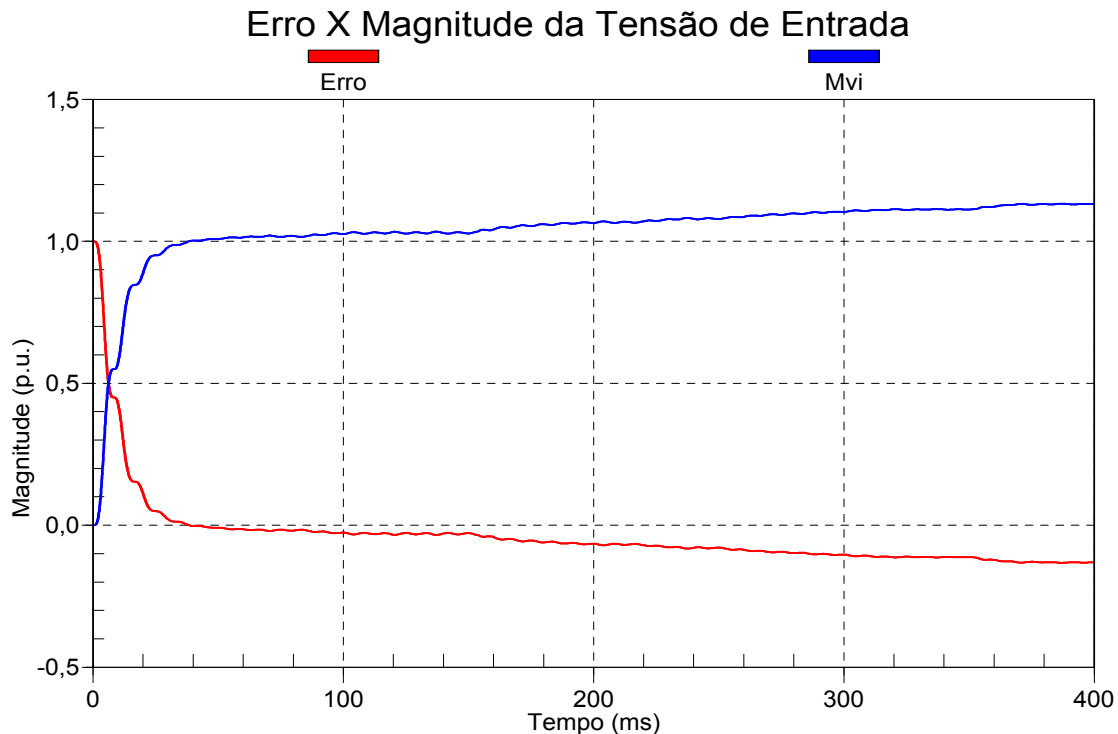


Figura 31 Relação entre o erro e a magnitude do sinal de entrada (p.u.)

Para registro, será apresentado o gráfico de validação da compensação de afundamento de tensão, com rastreamento da amplitude do sinal de entrada e da tensão regulada.

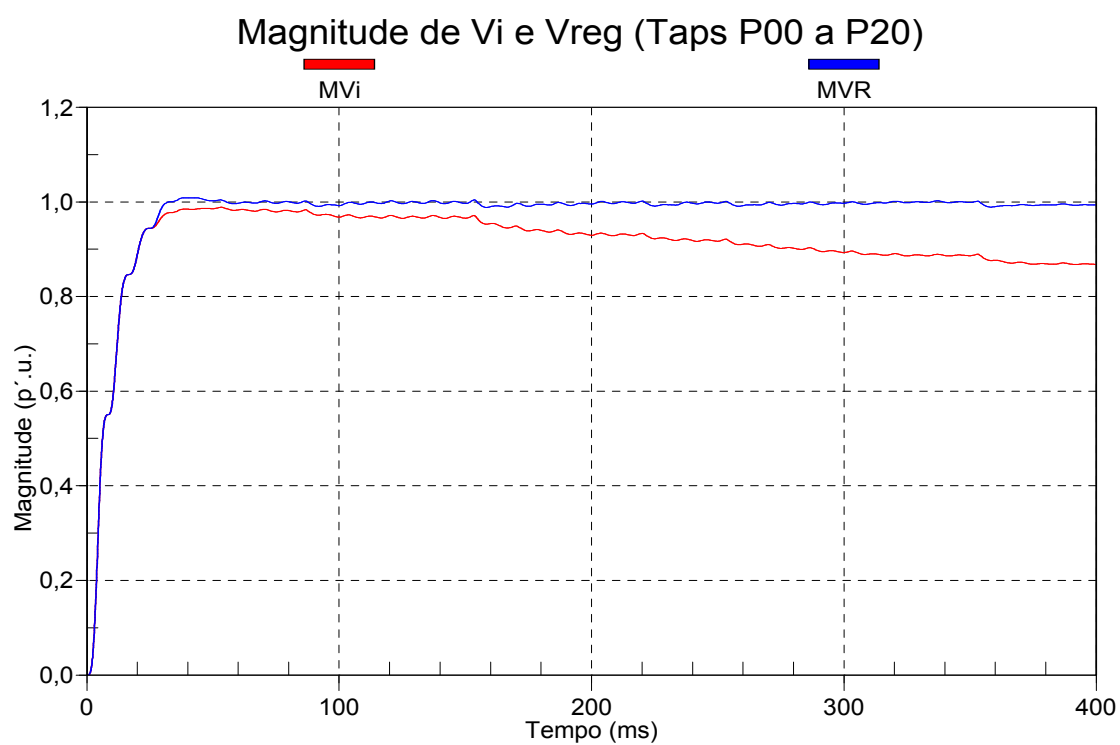


Figura 32 Magnitude de tensão na saída do PLL: sobretensão (MVi) e tensão regulada (MVR) Tap Positivo

5. Implementação de Controle Automático em um Modelo Expandido: S-DVR20

Uma vez validado, o modelo matemático pode servir de base para implementação em um modelo expandido, ou seja, um modelo que seja mais fiel em termos de operação ao dispositivo real. A estrutura do controle foi mantida, porém para que sua implementação em um modelo expandido fosse possível foram realizadas algumas adaptações como será mostrado no decorrer deste capítulo.

A implementação digital do modelo expandido foi mais complexa, uma vez que fez-se necessário estudar o circuito eletromagnético do regulador e suas influências, bem como estudar a lógica de controle aplicada ao disparo dos dispositivos SCR. Todos esses detalhes serão apresentados nas seções seguintes.

5.1 Modelo Eletromagnético

A impossibilidade inicial de se construir um protótipo de testes obrigou a realizar uma modelagem digital do circuito eletromagnético, a fim de observar o funcionamento do regulador. Para isso utilizou-se o programa de simulação de transitórios eletromagnéticos, PSCAD/EMTDC. A modelagem foi feita como será mostrado a seguir.

Primeiramente foram feitas algumas considerações e simplificações, para tornar o modelo mais próximo da realidade, sempre evitando torná-lo excessivo ou até mesmo redundante em alguns aspectos. Além disso, foram adotadas algumas considerações para as simulações:

- Indutância do autotransformador de 5% e resistência como 5% da reatância;
- Modelo de autotransformador adotado: *umec-xfmr-3w* (3 enrolamentos);
- Chave estática modelada por pares de tiristores em antiparalelo, sem circuito *snubber*;
- A duração da simulação foi fixada em 400 ms, com degrau de tempo de solução de 10 μ s e degrau de tempo de plotagem de 50 μ s.
- A unidade do eixo das abscissas em todos os gráficos simulados está em segundos (s).

A estimação da indutância de dispersão se fez necessária e para tanto foi calculada para posterior implementação no PSCAD. Como não há um modelo de autotransformador no PSCAD, o autotransformador do projeto foi modelado com transformadores de três enrolamentos, como será mostrado adiante. Uma resistência de curto-circuito foi inserida no modelo, a fim de analisar o comportamento do dispositivo perante as faltas simétricas. Apesar de estar fora do objetivo do trabalho, a análise de faltas será importante em trabalhos futuros, onde serão apresentados esses resultados.

O autotransformador do RECET foi modelado utilizando-se dois transformadores *umec* de três enrolamentos, como mostrado na Figura 33. Desta forma, os enrolamentos #2 e #3 de um deles simbolizam os *taps* T_1 e T_2 , respectivamente. De modo análogo, os enrolamentos #2 e #3 do outro *umec* representam os *taps* T_5 e T_{12} , respectivamente. Os enrolamentos #1 de ambos os transformadores são conectados em paralelo ligados à carga. Assim, permite-se que o fluxo magnético concatenado entre os enrolamentos seja o mesmo, tornando o modelo mais próximo de um autotransformador real.

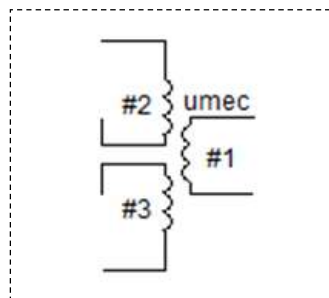


Figura 33 Modelo de transformador umec no PSCAD.

Uma vez idealizado o modelo de autotransformador, se fez necessário o cálculo de sua impedância de dispersão, como dito anteriormente. Os parâmetros nominais podem ser revistos no item 3.2, operação do RECET. Uma importante consideração a ser feita é que a modelagem eletromagnética foi feita apenas para o regulador Tipo A. O regulador tipo B será deixado para trabalhos futuros.

1 – Cálculo para o primeiro transformador:

$$V_{\text{enrol2}} = 49,7937 \text{ V}; V_{\text{enrol3}} = 99,5975 \text{ V} \Rightarrow V_{\text{trafo1}} = 149,38 \text{ V}$$

$$S_{\text{trafo1}} = V_{\text{trafo1}} \times I_{\text{nom}} = 149,38 \times 50 = 0,007469 \text{ MVA}$$

$$Z_{p2} = 0,05 \times \frac{V_{\text{enrol2}}}{I_{\text{nom}}} = 0,04979 \Omega \Rightarrow L_{p2} = 132,0689 \text{ uH}$$

$$Z_{p3} = 0,05 \times \frac{V_{\text{enrol3}}}{I_{\text{nom}}} = 0,0995 \Omega \Rightarrow L_{p3} = 263,9257 \text{ uH}$$

2 – Cálculo para o segundo transformador:

$$V_{\text{enrol2}} = 248,96875 \text{ V}; V_{\text{enrol3}} = 597,525 \text{ V} \Rightarrow V_{\text{trafo1}} = 846,49 \text{ V}$$

$$S_{\text{trafo1}} = V_{\text{trafo1}} \times I_{\text{nom}} = 846,49 \times 50 = 0,0423245 \text{ MVA}$$

$$Z_{p2} = 0,05 \times \frac{V_{\text{enrol2}}}{I_{\text{nom}}} = 0,2489 \Omega \Rightarrow L_{p2} = 660,2122 \text{ uH}$$

$$Z_{p3} = 0,05 \times \frac{V_{\text{enrol3}}}{I_{\text{nom}}} = 0,5975 \Omega \Rightarrow L_{p3} = 1584,9469 \text{ uH}$$

3 – Cálculo para o secundário dos transformadores:

$$Z_s = 0,05 \times \frac{7967}{50} = 7,967 \Omega \Rightarrow L_s = 21,1326 \text{ mH}$$

O passo seguinte foi a implementação do modelo no software.

A Figura 34 apresenta os blocos principais do RECET, ou seja, a chave estática CA e o autotransformador. É possível observar ainda que a tensão de entrada foi modelada por uma fonte de tensão ideal, com parâmetros de tensão e frequência ajustados externamente. Além disso, a impedância equivalente da rede foi modelada externamente por um circuito RL série.

Um bloco “FAULTS” foi adicionado ao bloco de chaves (omitido da figura), a fim de simular os vários tipos de curto-circuito na carga. Apenas uma entrada do bloco foi utilizada, pois o RECET é um dispositivo monofásico (este passo não é objetivo do trabalho). Apenas como registro, a carga da figura foi fixada em 159,00 Ω , fator de potência unitário.

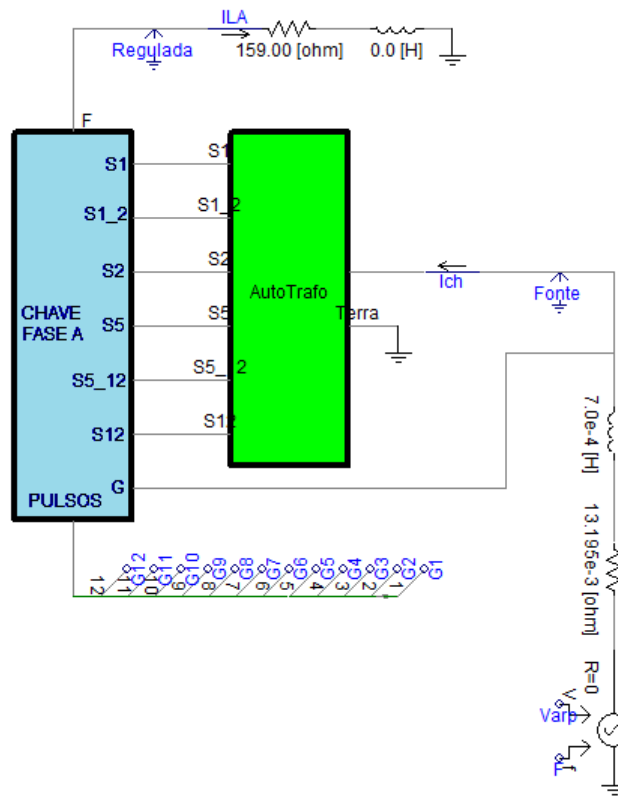


Figura 34 Modelo do RECET no PSCAD.

Explodindo os blocos da figura anterior, observa-se a estrutura da chave estática e do autotransformador, respectivamente, mostrados nas Figura 35 e 36.

Os pulsos G1 a G12 são os pulsos de acionamento do circuito *Gate Driver* e as tensões CG1 a CG12 são as tensões nos pares de chaves estáticas CA. De acordo com a folha de dados do fabricante³ essas tensões não podem ultrapassar 1,8 kV, sendo o limite máximo suportado por esses componentes.

³ SKKT 162, SKKH 162, Semipak 2 da Semikron.

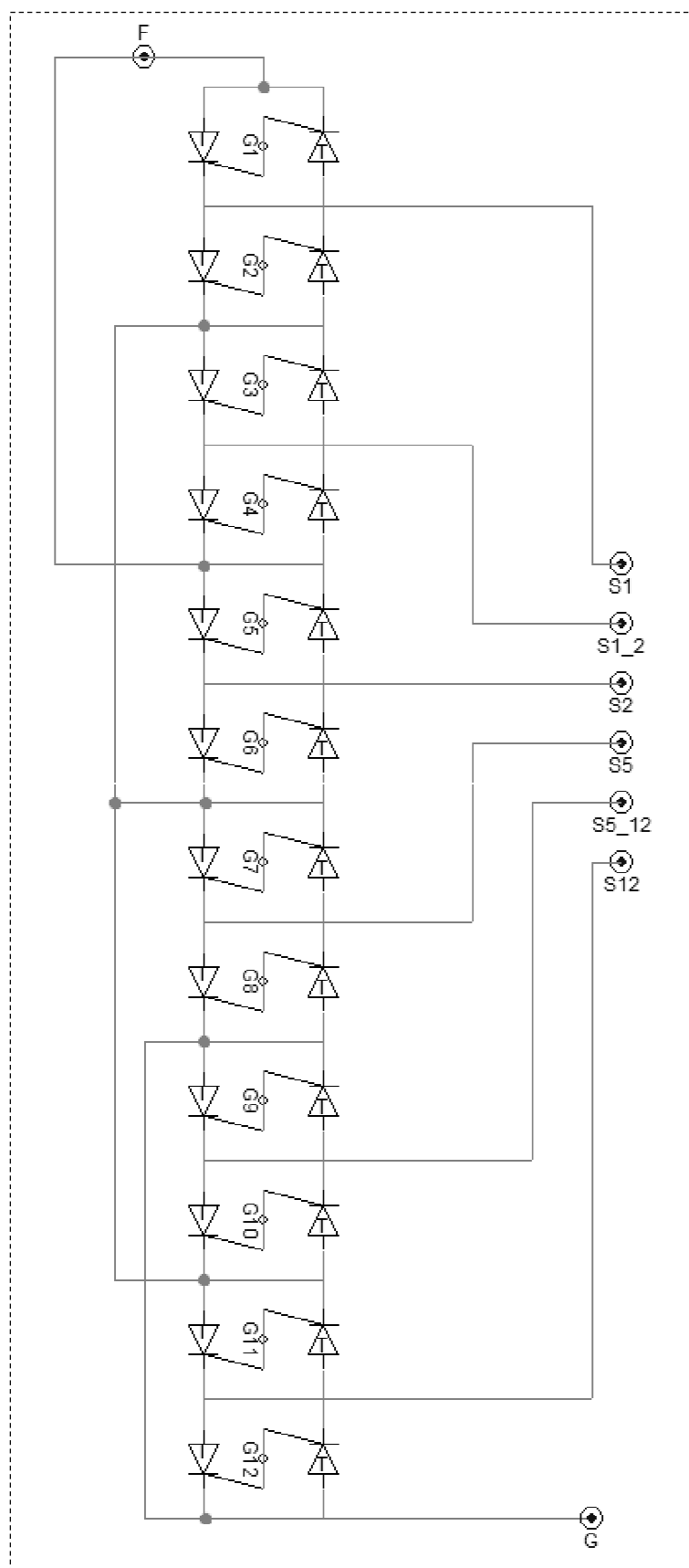


Figura 35 Modelo das chaves estáticas do RECET no PSCAD.

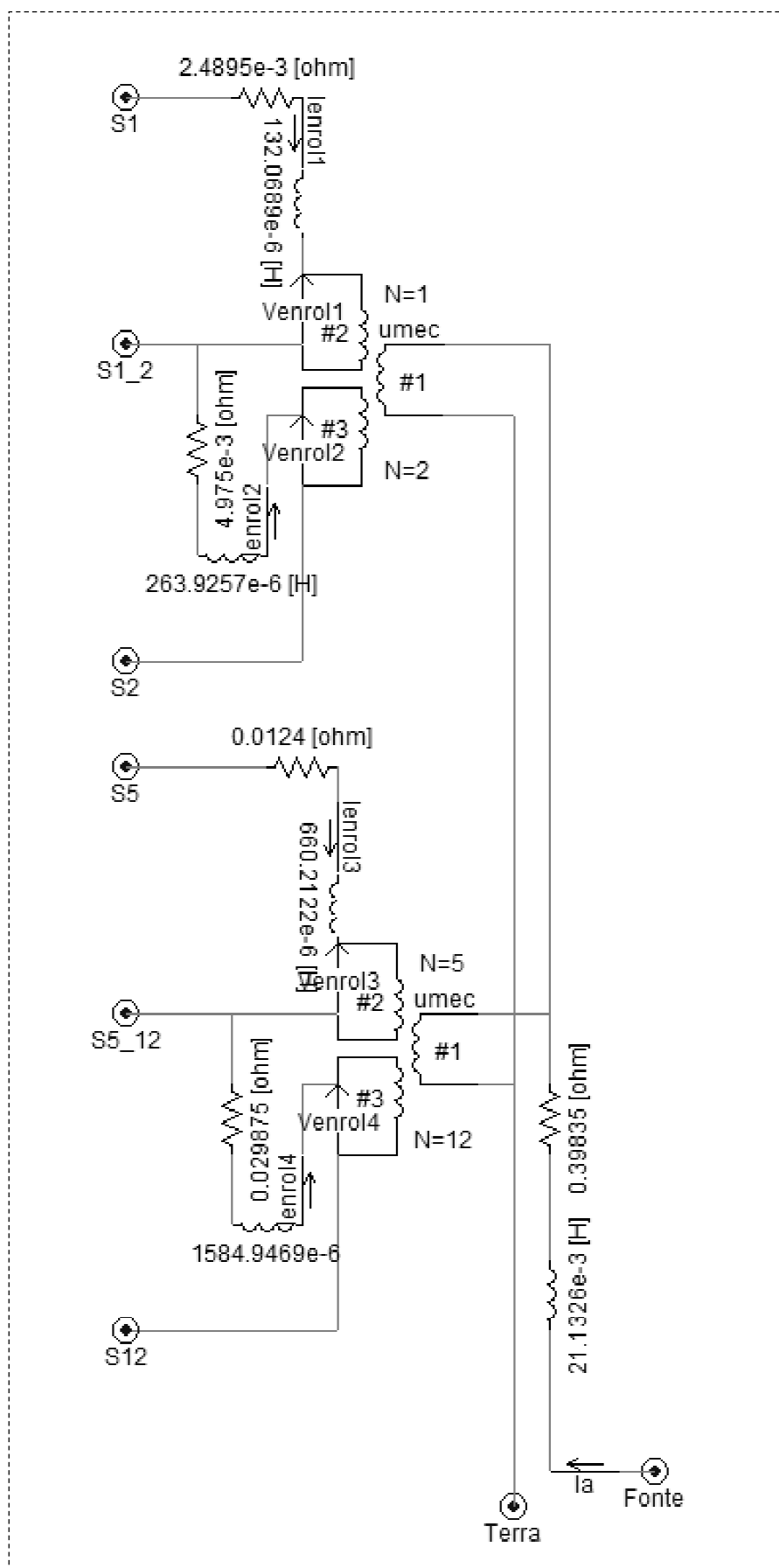


Figura 36 Modelo do autotransformador do RECET no PSCAD.

Como se observa na figura anterior, os valores das impedâncias de dispersão calculados já foram adicionados ao modelo digital. Os enrolamentos #1 do secundário foram ligados em paralelo, como já dito anteriormente.

Finalmente, deseja-se verificar se o controle proposto no capítulo 4 é aplicável no modelo expandido do RECET, ou seja, se o controle baseado em equações analíticas pode ser de fato utilizado no circuito eletromagnético do RECET.

Para verificar se o controle pode ser aplicado, primeiramente foi necessário adaptar o controle para as condições do modelo digital do circuito eletromagnético, onde se tem um conjunto de chaves estáticas que necessitam de pulsos nos *gates* dos tiristores para que possam conduzir. Vale recordar que os tiristores somente conduzem corrente elétrica após um pequeno pulso de corrente em seu *gate*, de maneira que a condução da corrente é sempre interrompida ao mudar de sentido, sendo necessário um novo pulso de corrente para retomar a condução. É necessário ainda ater-se tensão mínima de condução do tiristor, bem como a tensão máxima suportável de polarização reversa.

Assim foi utilizada uma estrutura de seleção de *taps* similar ao Bloco SST (III) do controle, com a diferença que no controle do modelo expandido o vetor de dados deve receber 12 valores reais, que serão os pulsos que irão fazer os quatro conjuntos de chaves serem acionadas. A estrutura pode ser observada na figura seguinte.

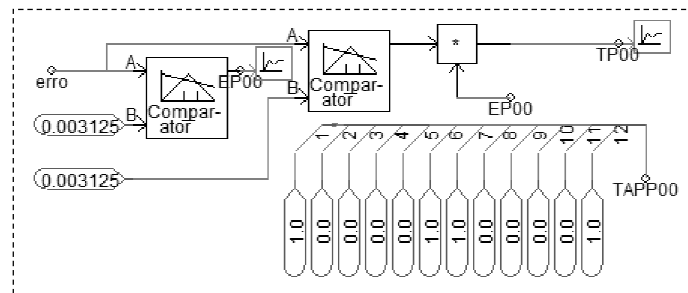


Figura 37 Estágio de controle para o *tap* 0 (zero), modelo expandido.

Dessa forma o vetor que será recebido pelo Bloco LCD será:

$$TAP(S)(YY) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12})$$

Os valores reais x_i tal que $i = 1, 2, \dots, 12$ somente podem assumir duas possibilidades: 0,0 ou 1,0. Este vetor de dados será enviado ao Bloco LCD, como dito anteriormente, porém neste caso para o disparo de um conjunto de quatro tiristores do grupo chave estática CA. Como este disparo deve ocorrer em um tempo programado, deve haver um circuito de disparo específico para este tipo de implementação. Este circuito será mostrado a seguir.

A Figura 38 ilustra o Bloco SST com o vetor de 12 dimensões em sua saída, ou seja, o canal de ligação dos valores no módulo principal de simulação do PSCAD. O indicação “G1” a “G12” sugere que cada um dos pontos é exatamente uma posição do vetor de dados.

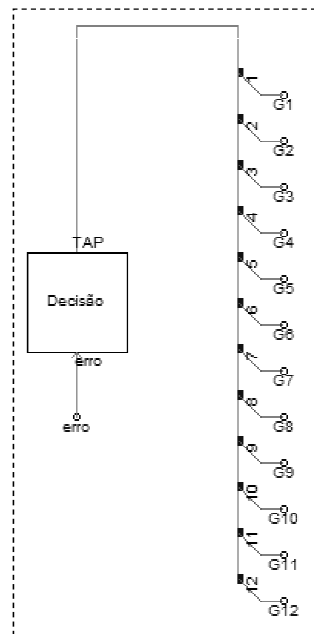


Figura 38 Bloco de seleção de taps com pulsos dos tiristores.

De maneira similar ao caso do modelo matemático, o script a seguir foi utilizado nesta implementação para habilitar os pulsos de disparo, ou seja, definir o vetor de dados a ser utilizado para compensação do sistema. Em outras palavras, o script abaixo atribuirá os valores ao vetor de saída conforme o sinal de erro gerado.

```

IF (TSYY.EQ.1) THEN
    DO NUM IT_0 = 1,12
        TAP(IT_0) = TAPSYT(IT_0)
    NUM CONTINUE
END IF

```

O circuito de disparo idealizado foi esquematizado como na figura seguinte:

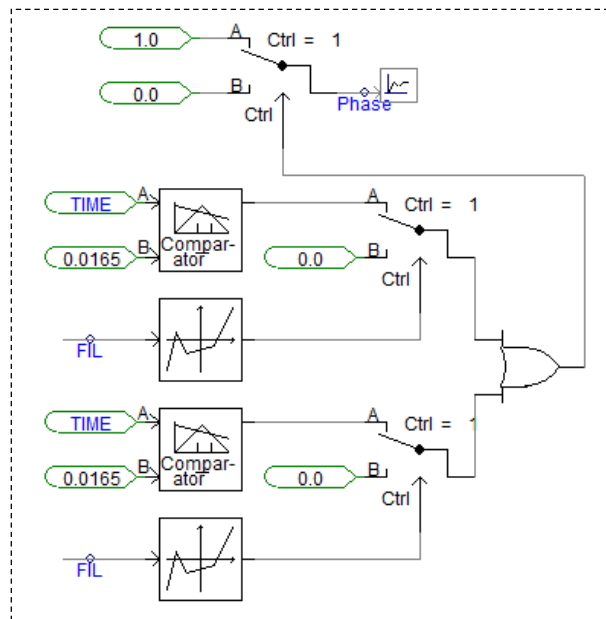


Figura 39 Circuito de disparo das chaves do RECET

Este circuito de disparo pode ser melhor entendido em [1]. Este circuito foi organizado de modo a permitir que os tiristores serão acionados tanto no semiciclo positivo quanto no semiciclo negativo. A variável *Phase* determina os instantes que a corrente passa por zero, ou seja, ela determina os pulsos de disparo das chaves de potência. O resultado desta variável na simulação é plotado no gráfico a seguir.

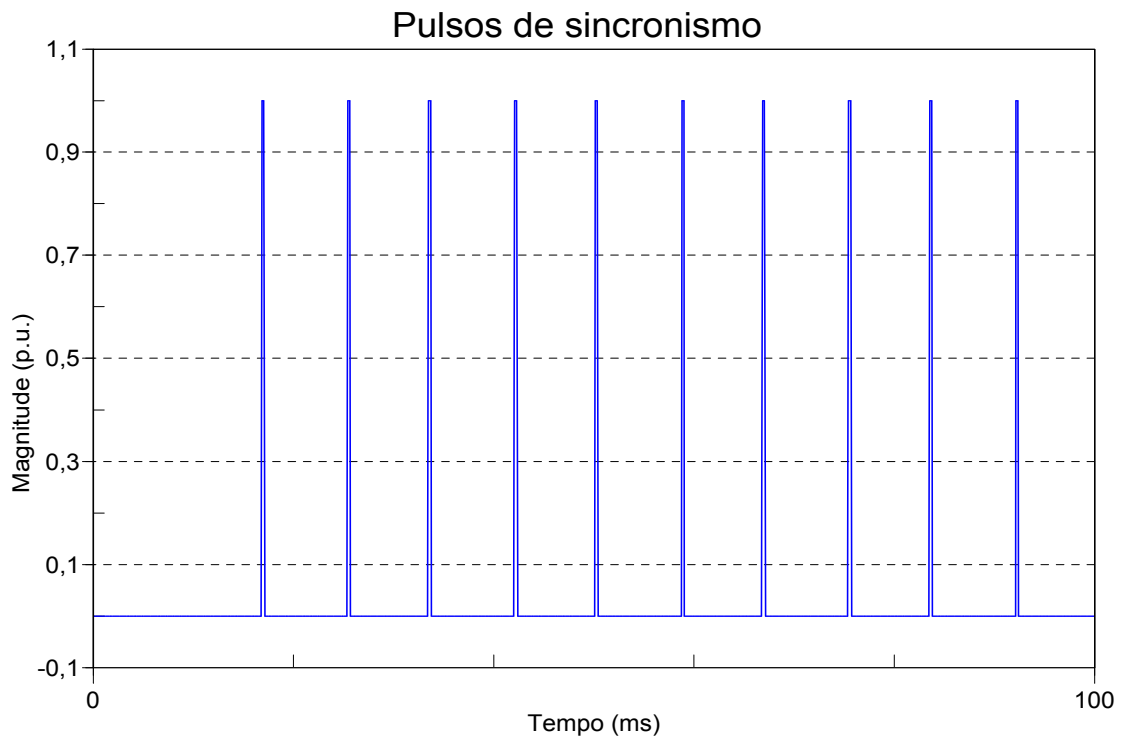


Figura 40 Pulsos de sincronismo para o modelo expandido de um S-DVR20

A fim de verificar o desempenho do controle sugerido em [1] em um modelo expandido de um regulador tipo S-DVR20, algumas simulações foram realizadas.

Assim como verificado para o modelo matemático, foi aplicada uma sobretensão instantânea nos terminais do regulador de modo a verificar a atuação do controle automático. Um degrau de tensão foi aplicado em aproximadamente 170 ms, como pode ser observado no gráfico seguinte.

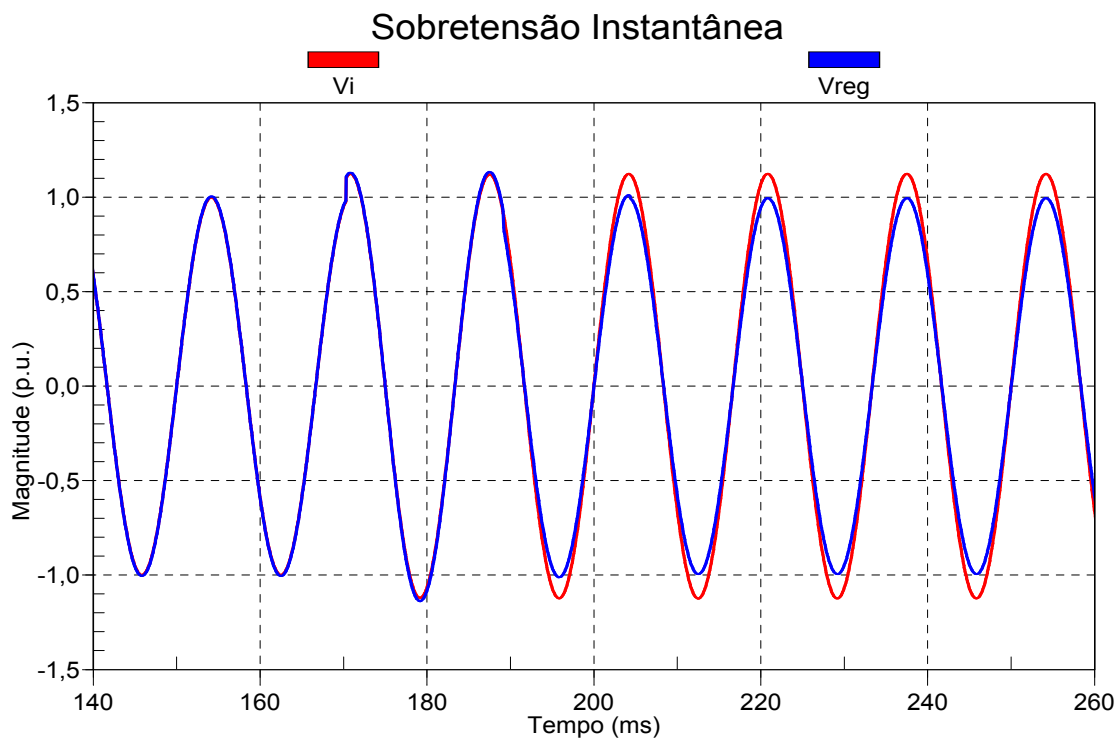


Figura 41 Sobretensão instantânea máxima para o modelo expandido

Para esta simulação foram usados os mesmos parâmetros da simulação do modelo matemático, ou seja, tempo de simulação de 400 ms, passo de integração de 10 μ s e plotagem 50 ms.

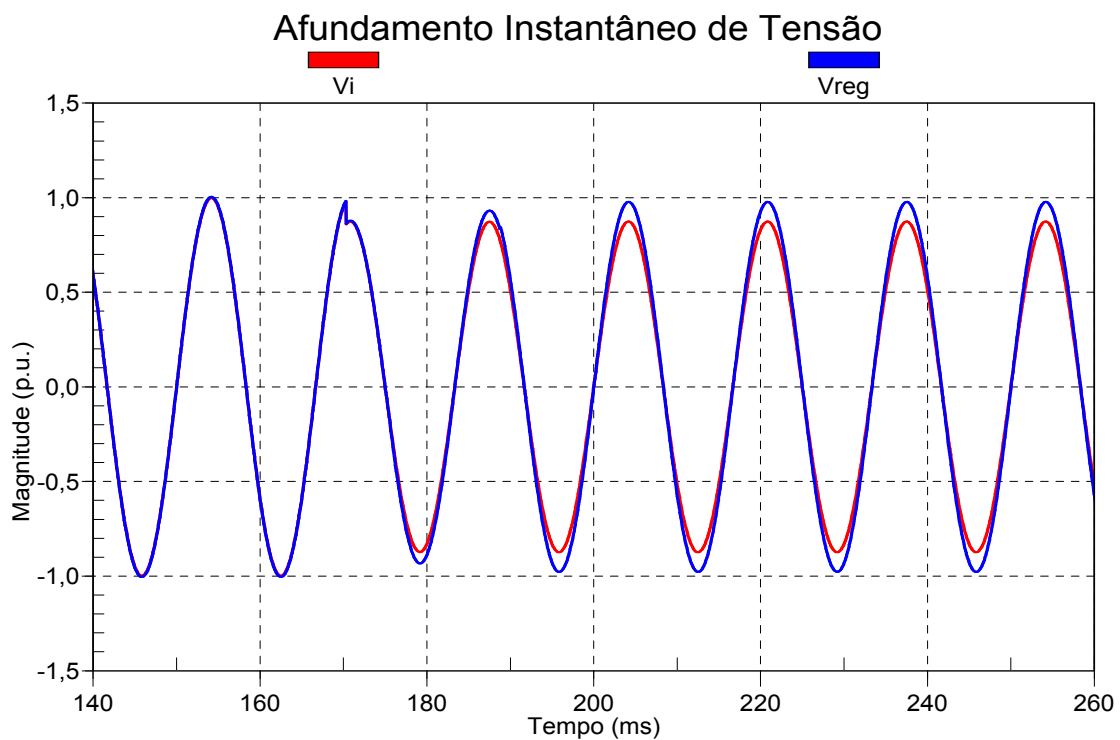


Figura 42 Afundamento de tensão instantâneo máximo para o modelo expandido.

Como pode ser verificado pela Figura 42, o sistema de controle foi capaz de regular a tensão em 1,0 p.u. para um afundamento de tensão máximo instantâneo, com disparo dos tiristores após rastreamento do circuito PLL em aproximadamente 190 ms. O rastreamento dessa tensão do PLL pode ser evidenciado na Figura 43, a seguir.

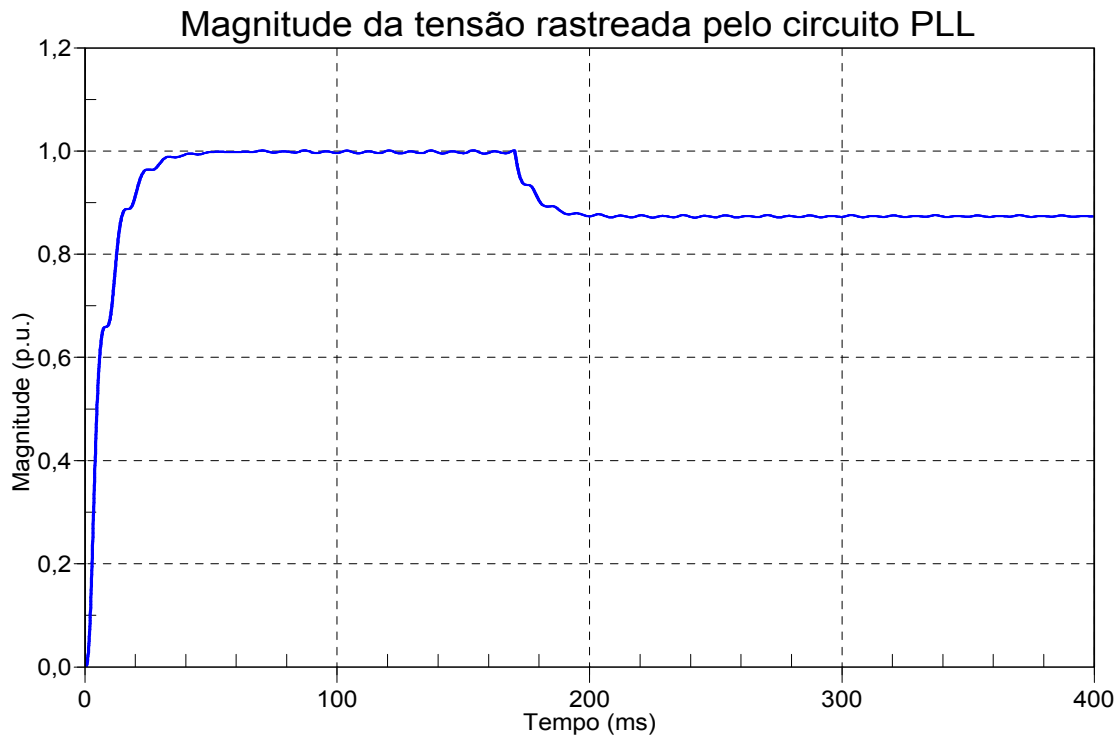


Figura 43 Magnitude da tensão rastreada pelo PLL: dinâmica pode ser melhorada.

Como pode ser verificado pela Figura 43, o circuito PLL levou cerca de 30 ms para rastrear corretamente a magnitude do sinal de entrada para uma variação instantânea de tensão de entrada. Sabe-se que uma variação instantânea, embora difícil, possa acontecer em alguns casos, seria adequado estudar a utilização de outros circuitos de sincronismo que levem um tempo de rastreamento menor para este caso.

A figura a seguir ilustra os pulsos de disparo dos tiristores, para o caso de afundamento instantâneo de tensão.

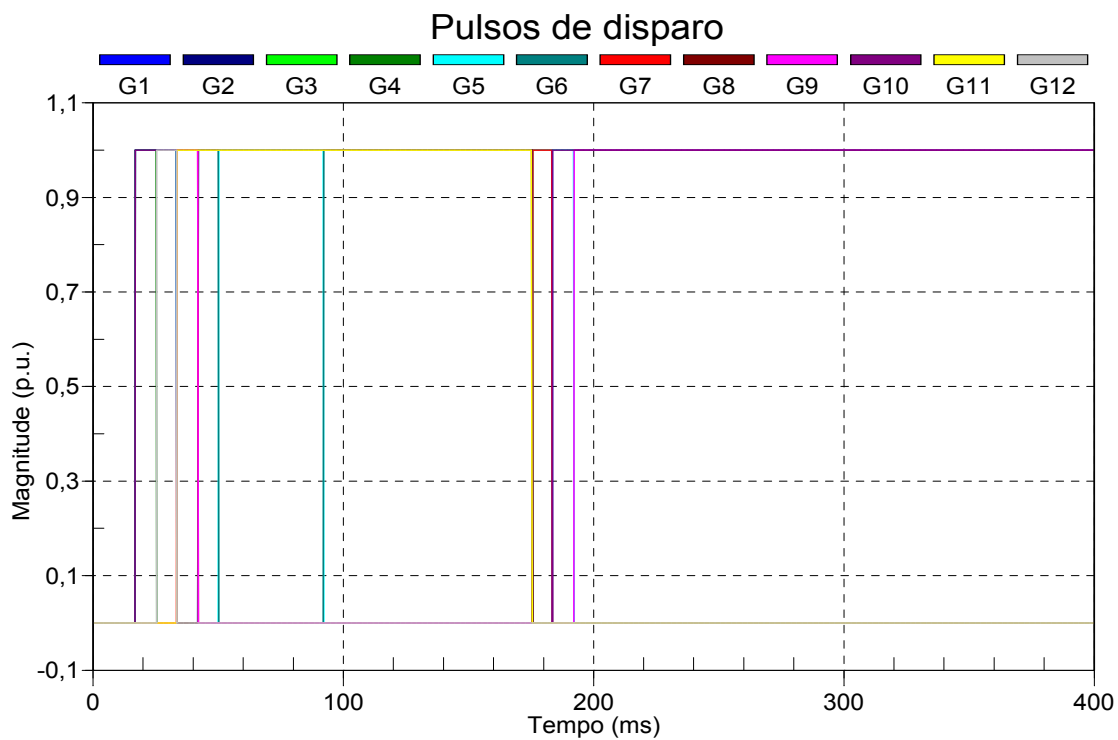


Figura 44 Pulsos de disparo dos tiristores para afundamento instantâneo de tensão.

Para finalizar os resultados da implementação do controle em um modelo expandido, o gráfico a seguir ilustra uma situação de máxima excursão de sinal, ou seja, a máxima capacidade de regulação do RECET, quando este opera em sua tensão mínima de compensação e após uma sobretensão máxima instantânea ele deve manter a tensão regulada em 1,0 p.u.

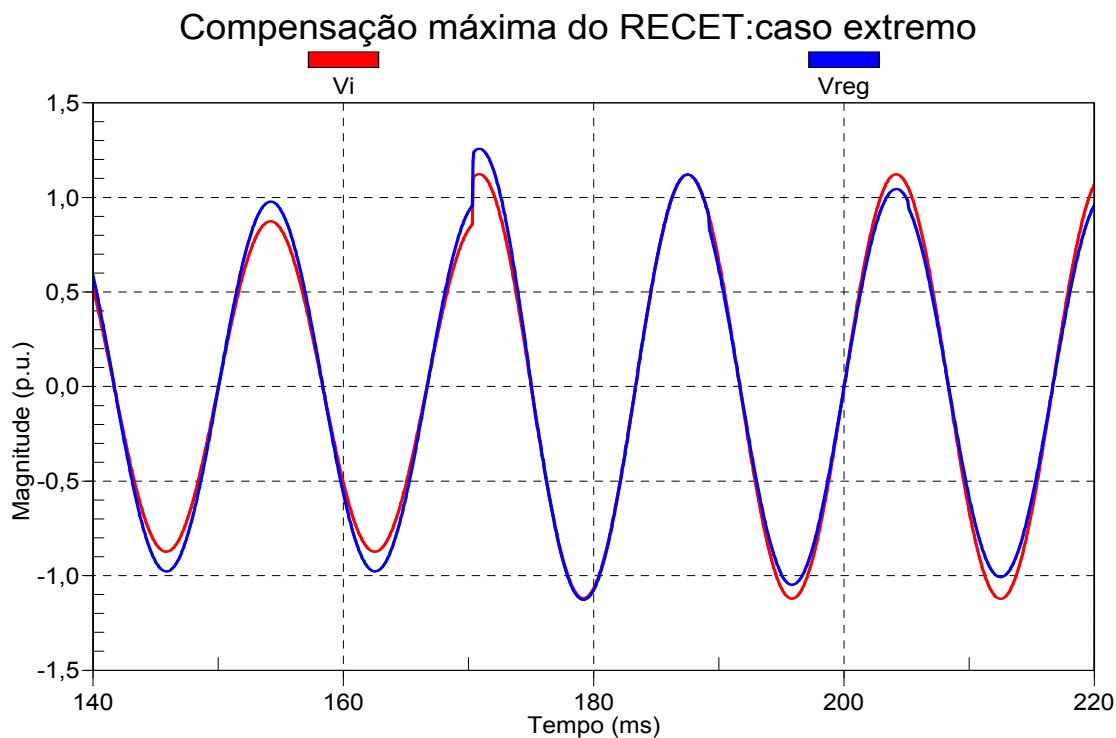


Figura 45 Compensação máxima do RECET: caso extremo.

Conforme se observa na Figura 45, o regulador opera com sua capacidade de compensação máxima para afundamento de tensão até aproximadamente 160 ms, quando há uma sobretensão máxima de 1,25 p.u., obrigando o regulador a comutar diretamente do *tap* N20 para o *tap* P20. Nessa manobra a tensão foi a aproximadamente 1,250 p.u., pico indesejável porém ocorrido devido a não inibição por parte do controle de uma variação instantânea do sinal de entrada.

Em seguida o controle se recupera do distúrbio e, em aproximadamente em 195 ms consegue retomar a tensão regulada para 1,0 p.u., como desejado.

6. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

Primeiramente, o estudo do tema mostrou a real necessidade de se utilizar os reguladores de tensão e, especificamente, os reguladores com comutação eletrônica de *taps* para compensação das variações transitórias de curta duração. Os reguladores de tensão com comutação eletrônica de *taps* possuem maior complexidade de modelagem se comparados aos eletromecânicos, devido fundamentalmente a utilização de dispositivos semicondutores em sua estrutura.

O sistema de controle é uma parte importantíssima no regulador eletrônico, pois é através do controle automático que a regulação é feita. Foi proposto um sistema de controle para o RECET, baseado em suas equações de compensação. Verificou-se que essas equações foram validadas, através da simulação do sistema proposto. Verificou-se ainda que o controle é capaz de dar autonomia ao regulador, ou seja, o regulador é capaz de se auto-regular, sabendo somente o valor da tensão de entrada do sistema. O modelo matemático foi implementado no S-DVR20, porém esta modelagem pode ser expandida para qualquer regulador tipo S-DVR.

Como o objetivo é a implementação do controle em um protótipo que será instalado no sistema de distribuição, foi feita uma análise do sistema de controle baseado em equações, já validadas, em duas implementações distintas: o modelo expandido, que leva em consideração o circuito eletromagnético e o modelo matemático, que leva em consideração somente a lógica de acionamento dos *taps*, segundo as equações de compensação. Verificou-se que o controle funciona adequadamente em ambos os modelos estudados.

Tendo como base os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que o controle baseado em equações analíticas pode ser implementado no protótipo. Para que seja de fato implementado, é necessário transmitir toda a lógica das equações ao DSP, para que esse possa acionar o circuito *Gate Driver* e então de fato realizar o controle do regulador. Esse trabalho fica como sugestão para trabalhos futuros. Uma sugestão inicial é utilizar o *Hardware-in-the-Loop* para os testes. Outros dois temas sugeridos são o estudo do controle automático para o regulador tipo B e a análise de faltas do regulador de modo a obter dados de seu comportamento.

7. Anexo: descrição simplificada de um circuito EPLL

Antes de falar do EPLL se faz necessário apresentar o seu precursor, o circuito PLL [7]. Do inglês *Phase Locked Loop*, este circuito possui uma característica muito interessante para as aplicações em eletrônica de potência: ele é capaz de gerar um sinal em sincronismo de fase com a componente fundamental do sinal de entrada do circuito. Este rastreamento de fase pode ser muito útil ao se trabalhar com sistemas de controle.

Estruturalmente, o PLL é formado por três blocos distintos: o detector de fase (*PD – Phase Detector*), o filtro (*LF – Loop Filter*) e o controlador de oscilação de tensão (*VCO – Voltage Controlled Oscillator*). Esta estrutura pode ser visualizada na Figura A.1.

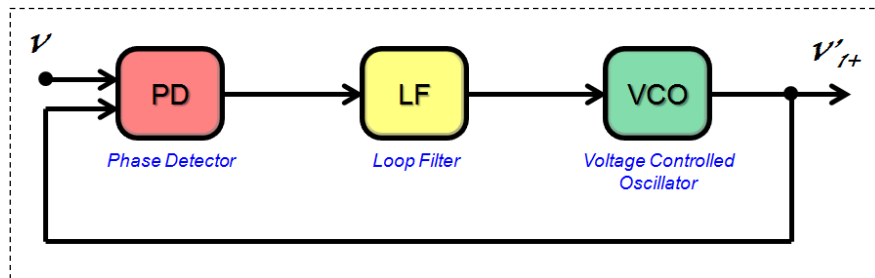


Figura A.1 Estrutura funcional de um PLL.

O bloco de detecção de fase gera o sinal de erro que será a entrada do bloco LF, ou filtro. O bloco LF é o controlador do PLL e o seu sinal de entrada será nulo em regime permanente. Finalmente o bloco VCO é aquele cujo sinal de saída servirá de realimentação do circuito, ou seja, o sinal que se deseja igualar ao sinal de entrada para que produza um erro nulo.

Na Figura A.2 pode-se verificar a estrutura matemática de um PLL, que consiste de um multiplicador no bloco de detecção de fase, uma parte proporcional-integral no filtro (PI) e um integrador com realimentação de cosseno no bloco VCO. Esta estrutura simples permite o rastreamento de fase da fundamental do sinal de entrada v como se observa na variável na estrutura que leva a Θ_{out} . Vale salientar que o sinal de entrada deve ser periódico para o correto funcionamento deste circuito.

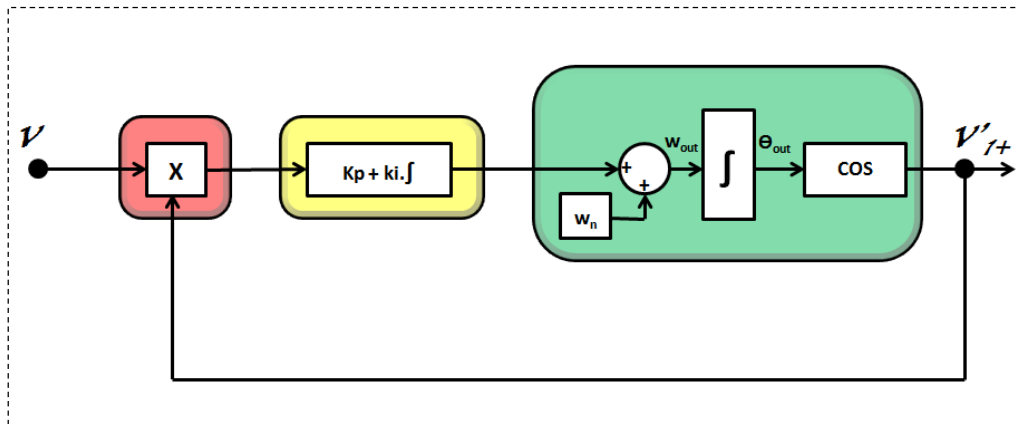


Figura A.2 Estrutura matemática de um PLL.

A diferença fundamental existente entre o circuito PLL e o EPLL ou *Enhanced Phase-Locked Loop* é que o EPLL inclui um novo esquema para detecção de fase. A saída do bloco VCO no EPLL não mais realimenta diretamente a entrada: este sinal passa por um refinamento, como pode ser observado pela Figura A.3.

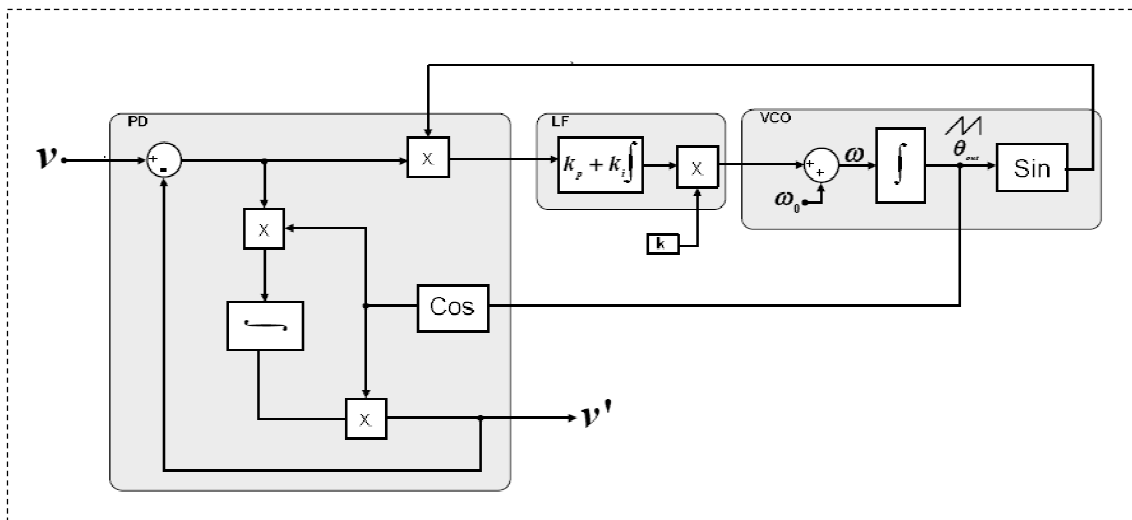


Figura A.3 Estrutura matemática de um EPLL [16].

Com esta nova configuração, o EPLL possibilita o rastreamento da amplitude do sinal de entrada através da realimentação negativa do circuito [16], assim como sinais em quadratura com a fundamental do sinal de entrada e logicamente a fase deste sinal. Outra característica deste circuito é que o mesmo é capaz de gerar um sinal de saída cujo ângulo de fase é o mesmo do ângulo de fase do sinal de entrada.

A utilização do circuito EPLL torna-se bastante interessante para a aplicação deste trabalho, no caso a implementação de um sistema de controle para um regulador automático de tensão. Os ajustes dos ganhos e parâmetros dos blocos acima ilustrados e

apresentados na Figura 14 foram feitos tendo como base recomendações e estudos de referência contidos em [7], [9] e [17], além da experiência adquirida juntos aos pesquisadores durante o desenvolvimento do trabalho em fases anteriores [2].

8. Referências Bibliográficas

- [1] Aredes, M.; Menas, J.S; Brasil, T.A, Reis, M.S., “*A General S-DVR Symmetrical Model and Implementation*”, In: *IEEE ISIE '12 - 21st IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Maio de 2012, Hangzhou, China, p. 1-6.
- [2] Aredes, M.; Encarnação, Lucas Frizera; Moor Neto, J. A.; Reis, M. S.; Monteiro, L. F. C.; Siqueira, M. J. V.; Sanches, C. C.. Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração. In: VIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau. VIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, v. 1. p. 1-5.
- [3] Aredes, M.; Encarnação, Lucas Frizera; Reis, M. S.; Moor Neto, J. A.; Gavazzi, M; Sanches, C. C.. Desenvolvimento e Implementação de um Modelo Digital do Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de TAPs Operando num Ramal de Distribuição de Média Tensão. In: SENDI, 2008, Olinda. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2008. p. 1-10.
- [4] Aredes, M.; Reis, M. S.; Neto, J.A.M.; Encarnação, Lucas Frizera ; Gavazzi, M . Desenvolvimento de um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de TAPs. In: XIX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007, Rio de Janeiro. XIX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica XIX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: cigré, 2007. p. 1-8.
- [5] Liu, J.W.; Choi ,S.S.; Chen, S.,, “Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.18, no.4, p.1403-1409, Oct.2003.
- [6] Liu, J.W.; Choi, S.S.; Chen, S.,, “Application of step-dynamic voltage regulator to single-phase system”, *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002. IEEE, vol.2,no., p.713-718 vol.2, 2002.

- [7] Karimi, G. & Iravani, M. R. A New Phase-Locked Loop (PLL) System. Proceedings of the 44th IEEE-2001 Midwest Symposium Circuits and Systems – MWCAS 2001, Vol.1, 2001, pp. 421-424.
- [8] Karimi, G. & Iravani, M. R. A Nonlinear Adaptive Filter Online Signal Analysis in Power Systems: Applications. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 617-622.
- [9] S. Eren, M. Karimi, G., A. Bakhshai. Enhanced Frequency-Adaptive Phase-Locked Loop for Distributed Power Generation System Applications. Queen's University. Department of Electrical and Computer Engineering. Kingston, Ontario, Canada.
- [10] ANEEL, “Resolução no 505”, novembro de 2001, <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf>, 21 de Maio de 2012, 20:24h.
- [11] Leszczynski, J. T., “*Voltage Regulation Selection in Power Distribution Design*”, . *Textile Industry Technical Conference*, IEEE/1998, Greenville, USA, 1998, pp. 10/1-10/6.
- [12] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 395, DE 15 DE DEZEMBRO DE 2009, Revisão 1 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, PP. 5-7, §1º.
- [13] Larsson, T. & Innanen, R. & Norström, G., “*Static Electronic Tap-Changer for Fast Phase Voltage Control*”, IEEE Electric Machines and Drives. Conference Record, Milwaukee, USA, 1997, pp. TC3.4-1-TC3.4-3.
- [14] Reis, M.S., Qualificação de Doutorado: “Implementação do RECET II”, 2011. Laboratório de Eletrônica de Potências e Média Tensão, COPPE/UFRJ. Orientador: Prof. Mauricio Aredes, Dr. Ing.

- [15] Aredes, M, “Notas de aula de Eletrônica de Potência: Synchronization Based on a Phase-Locked Loop”, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [16] Mesquita, L. M. O, Estudo comparativo de algoritmos de sincronização com aplicações em Eletrônica de Potência, Projeto Final de Graduação, UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 93p, 2011.
- [17] Ghartemani, M.K., Iravani, M.R., Rogers, E.S., “*A New Phase-Locked Loop (PLL) System*”, IEEE Transactions, 2001.
- [18] IEEE *Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage and Induction-Voltage Regulators*. IEEE Standards, ANSI/IEEE Std C57.15-1986.
- [19] IEC *International Standard 60214:2003, Tap-Changers, Part I: Performance requirements and test methods*, 2003.
- [20] Handley B., Redfern M. e White S. “*On load tap-changer conditioned based maintenance*”, [Periódico] // IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.. - Julho de 2001. - Vol. 148.
- [21] ITB Regulador de Tensão Monofásico RAV-2 comando CTRL-1 [Periódico]. - 2007.
- [22] Spence G.; Hall A. C., “On-Load Tap-Changers Current Experience and Future Development – Users Experience and Perspective”, [Periódico] // National Grid Company. - Outubro de 1999.
- [23] Spence G.; Hall A.C., “On-Load Tap-Changers Current Experience and Future Development – Users Experience and Perspective”, [Periódico] // National Grid Company - 1995.
- [24] Peck D.A., “On-Load Tap-Changers Current Experience and Future Development – Principles and Resulting Benefits of Separate Tank (External) Tap-Changers”,

[Periódico] // Developments On-Load Tapchangers: Current Experience and Future, IEE European Seminar, 1995.

[25] Toh, C.W.; Lock, C.S.; Chen, S.; Choi, S.S.; “A voltage quality improvement solution using step dynamic voltage regulator”, p.983-988 vol.2, Nanyang Technol. Institute, IEE Conf. Publications, 2000.

[26] Degeneff R.C., “A New Concept for a Solid-State On-Load Tap Changers”, [Conferência] // IEE, CIRED 97. - 1997.

[27] Demirci, O., “A new approach to solid-state on load tap changing transformers”, [Periódico] // Power Delivery, IEEE Transactions, 1998.

[28] Faiz, J.; Siahkollah, B.; “New Solid-State Onload Tap-Changers Topology for Distribution Transformers”, [Periódico] // Power Delivery, IEEE Transactions, Janeiro de 2003.

[29] Jiang, H., “Fast Response GTO Assisted Novel Tap Changer”, [Periódico] // IEEE Trans. on Power Delivery, 2001.

[30] Shuttleworth, R., “New tap changing scheme [Periódico] // Electric Power Applications”, IEE Proceedings, Janeiro de 1996. - vol. 143.

